

***MEMORIAS  
DE LA  
REAL ACADEMIA SEVILLANA DE CIENCIAS  
2022***

© Real Academia Sevillana de Ciencias  
Año de publicación: 2022

*EDITA:*  
Real Academia Sevillana de Ciencias

*IMPRIME:*  
Impresión León - Utrera (Sevilla)

*DEPÓSITO LEGAL:*  
SE-1990/91

*I.S.S.N.:*  
2530-1829

## ***AGRADECIMIENTOS***

La publicación de este volumen de MEMORIAS ha sido posible gracias a la financiación parcial prestada por la Fundación Cajasol. A esta institución desea expresar esta Real Academia su agradecimiento.





## ÍNDICE

Relación de miembros de la Real Academia Sevillana de Ciencias a 31 de diciembre de 2022 .....	11
Memoria de la Real Academia Sevillana de Ciencias del año 2022 .....	15

## DISCURSOS

“El transistor como pieza angular de las TIC. Luces y sombras”, por el Ilmo. Sr. D. José Luis Huertas, resumen fusionado de la conferencia “El lado oscuro de las TIC”, pronunciada en el acto de apertura del curso 2022-2023, el 12 de diciembre de 2022 .....	23
Palabras del Excmo. Sr. D. José Luis de Justo Alpañés, presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, en el acto de apertura del curso 2022-2023, el día 12 de diciembre de 2022 .....	85
“Homogenización biótica de la Tierra por invasiones biológicas”, por la Ilma. Sra. D <sup>a</sup> . Montserrat Vilà Planella. Discurso de toma de posesión el día 21 de abril de 2022 .....	89
Discurso de recepción como académica numeraria de Monserrat Vilà Planella, por el Ilmo. Sr. D. Juan Cornejo Suero, el día 21 de abril de 2022 .....	111
“Qué tienen de especiales las funciones especiales”. Discurso de toma de posesión del Ilmo. Sr. D. Antonio J. Durán Guardado, el día 1 de junio de 2022 .....	121
Discurso de contestación al del profesor Durán Guardado, por el Ilmo. Sr. D. Enrique Fernández Cara, el día 1 de junio de 2022 .....	145
“La ciencia de la ecología y el análisis de la complejidad”. Discurso de toma de posesión del Ilmo. Sr. D. Pedro Jordano Barbudo, el día 3 de octubre de 2022 .....	149

Discurso de contestación al del profesor al del profesor Jordano Barbudo, por el Excmo. Sr. D. Benito Valdés Castrillón, el día 3 de octubre de 2022 .....	179
--	-----

### **CONFERENCIAS**

#### **CURSO DE HISTORIA Y FILOSOFÍA DE LA CIENCIA Y DE LA TÉCNICA**

“La marquesa de Châtelet y el fuego”, por el profesor Antonio Roselló Segado .....	201
“El misterio de "las mesas giratorias". Polémica entre ciencia, iglesia y espiritismo en la España del siglo XIX”, por el doctor Javier Almarza Madrera .....	213
“La Real Sociedad Patriótica de Sevilla y el Laboratorio de Química de 1784”, por el profesor Manuel Castillo Martos .....	233
“Religión y ciencia: ¿Coexistencia, complementariedad, convergencia o conflicto?”, por el profesor Agustín García Asuero .....	257

#### **LOS MARTES DE LA ACADEMIA**

“Tras el rastro de la invisibilidad: átomos, trazos y palabras”, por el profesor Agustín Rodríguez González-Elipe .....	323
“Power to the people”, por el profesor Antonio Gómez Expósito .....	335
“Cambio climático y ambiental en la cuenca mediterránea”, por la profesora Montserrat Vilà Planella .....	347

#### **CICLO DE CONFERENCIAS RASC-FUNDACIÓN CAJASOL**

“El futuro del almacenamiento de energía: baterías de litio y más allá”, por el profesor José Luis Tirado Coello .....	358
---	-----

---

**CICLO INTERACADÉMICO SOBRE LA TABLA PERIÓDICA  
DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS**

Andrés Manuel del Río y el elemento vigésimo tercero: Pancrom(i)o, Eritron(i)o, Zimapanio, Rionio, Odinio, Erian, Sefströmium o Vanadi(n), por el Excmo. Sr. D. Agustín G. Asuero (31-10-2019) .....	377
--	-----

**ENTREGA DE LOS PREMIOS A INVESTIGADORES JÓVENES  
CORRESPONDIENTES AL AÑO 2019**

*Acto celebrado en el Salón de Actos de la Real Maestranza  
de Caballería de Sevilla, el día 26 de mayo de 2022*

Discurso de Antonio Franconetti García, Premio a Investigadores Jóvenes “Real Academia Sevillana de Ciencias“, convocatoria de 2019 .....	435
Falta título .....	437
Palabras del Excmo. Sr. D. José Luis de Justo Alpañés, presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias .....	439





# ***RELACIÓN DE MIEMBROS DE LA REAL ACADEMIA SEVILLANA DE CIENCIAS A DICIEMBRE DE 2022***

## *JUNTA DE GOBIERNO*

Presidente: Excmo. Sr. Dr. D. José Luis de Justo Alpañés (13/02/96)  
Vicepresidente: Ilmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta (05/11/15)  
Secretario: Ilmo. Sr. Dr. D. Enrique Fernández Cara (25/04/17)  
Tesorero: Ilmo. Sr. Dr. D. Alfonso Jiménez Martín (18/03/03)  
Bibliotecario: Ilmo. Sr. Dr. D. Javier Fernández Sanz (20/04/17)

## *ACADÉMICOS DE NÚMERO*

### *Sección de Química*

Ilma. Sra. D<sup>a</sup>. Rosario Fernández Fernández (28/04/14) - Presidenta sección  
Ilmo. Sr. D. Javier Fernández Sanz (20/04/17) - Bibliotecario  
Ilmo. Sr. D. Agustín Rodríguez González-Elipe (13/02/2020)  
Ilmo. Sr. D. Francisco Sánchez Burgos (22/10/02)

### *Sección de Física*

Ilmo. Sr. D. José Javier Brey Abalo (16/12/97) - Presidente sección  
Ilmo. Sr. D. Alejandro Conde Amiano (15/06/04)  
Ilmo. Sr. D. Arturo Domínguez Rodríguez (07/05/07)  
Ilmo. Sr. D. José Luis Huertas Díaz (27/11/06)  
Excmo. Sr. D. Rafael Márquez Delgado (26/05/86 - Fundador) - Presidente de honor

### *Sección de Matemáticas*

Ilmo. Sr. D. Juan Arias de Reyna Martínez (01/12/1988)  
Ilmo. Sr. D. Tomás Domínguez Benavides (27/06/95)  
Ilmo. Sr. D. Antonio José Durán Guardado (01/06/2022)  
Ilmo. Sr. D. Enrique Fernández Cara (25/04/17) - Secretario  
Ilmo. Sr. D. Luis Narváez Macarro (01/02/00) - Presidente de sección  
Excmo. Sr. D. Antonio Pascual Acosta (11/12/03)

*Sección de Biología*

- Ilmo. Sr. D. Andrés Aguilera López (14/12/2017)  
Ilmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta (05/11/15) - Vicepresidente  
Ilmo. Sr. D. Miguel García Guerrero (01/04/08)  
Excmo. Sr. D. Francisco García Novo (16/10/89) - Presidente sección  
Ilmo. Sr. D. Pedro Jordano Barbudo (03/10/2022)  
Ilmo. Sr. D. José López Barneo (13/09/2004)  
Excmo. Sr. D. Benito Valdés Castrillón (13/11/90) - Presidente del Instituto  
de Academias de Andalucía

*Sección de Ciencias de la Tierra*

- Ilmo. Sr. D. Juan Cornejo Suero (26/03/07) – Presidente sección  
Ilmo. Sr. D. Diego de la Rosa Acosta (13/05/13)  
Ilma. Sra. D<sup>a</sup>. María del Carmen Herмосín Gaviño (22/11/18)  
Ilmo. Sr. D. Joaquín Rodríguez Vidal (25/11/2019)  
Ilma. Sra. D<sup>a</sup>. Montserrat Vilà Planella (21/04/2022)

*Sección de Tecnología*

- Excmo. Sr. D. Javier Aracil Santonja (21/11/95)  
Excmo. Sr. D. José Luis de Justo Alpañés (13/02/96) - Presidente de la Academia  
Excmo. Sr. D. Jaime Domínguez Abascal (20/10/14) - Presidente de sección  
Ilmo. Sr. D. José Domínguez Abascal (09/04/02)  
Ilmo. Sr. D. Antonio Gómez Expósito (02/06/2014)  
Ilmo. Sr. D. Alfonso Jiménez Martín (18/03/03) - Tesorero  
Ilmo. Sr. D. José Luis Manzanares Japón (17/12/96)

**ACADÉMICOS ELECTOS**

**ACADÉMICOS CORRESPONDIENTES**

- Excmo. Sr. D. Joan Bertrán i Rusca, Barcelona (04/05/2009)  
Excmo. Sr. D. Manuel Catalán Pérez de Urquiola, San Fernando, Cádiz (05/03/1996)  
Ilmo. Sr. D. Jacques Castaing, París (15/06/2009)  
Ilmo. Sr. D. Manuel Martín Lomas, San Sebastián (16/04/2007)  
Ilmo. Sr. D. Manuel Pastor Pérez, Madrid (11/03/2010)  
Ilmo. Sr. D. Vicente Rives Arnau, Salamanca (28/06/210)  
Excmo. Sr. D. Juan Manuel Rojo Alaminos, Madrid (17/12/2008\* - 05/06/2012)  
Ilmo. Sr. D. Sebastián Vieira Díaz, Madrid (25/05/2009)

---

### ***ACADÉMICOS DE HONOR***

Excmo. Sr. D. Avelino Corma Canos (18/05/2005)

Ilmo. Sr. D. Federico García Moliner (06/11/2006)

Excmo. Sr. Robert Huber (19/05/2016)

Ilmo. Sr. D. Jean-Marie Lehn (29/05/2007)

### ***ACADÉMICOS SUPERNUMERARIOS***

Excmo. Sr. D. Ernesto Carmona Guzmán (18/05/06)

Excmo. Sr. D. Enrique Cerdá Olmedo (26/05/86 - Fundador)

Ilmo. Sr. D. Carlos Manuel Herrera Maliani (23/10/06)

Excmo. Sr. D. Manuel Losada Villasante (26/05/86 - Fundador)

Ilmo. Sr. D. Guillermo Munuera Contreras (02/02/05)

Excmo. Sr. D. José María Trillo de Leyva (25/01/94)

Ilmo. Sr. D. Manuel Zamora Carranza (22/05/91)

Las fechas entre paréntesis corresponden al día de toma de posesión, a excepción de aquellas marcadas con asterisco, que se corresponden con la fecha de ingreso en las distintas categorías de académicos/as.



## ***MEMORIA DE LA REAL ACADEMIA SEVILLANA DE CIENCIAS DEL AÑO 2022***

Durante el año 2022, la labor de la Academia ha estado encaminada al desarrollo de distintas actividades de carácter público. De estas actividades y de otros hechos relevantes se da cuenta a continuación:

### ***1. JUNTAS GENERALES***

Se celebró sesión ordinaria de la Junta General el día 21 de febrero y sesión extraordinaria el día 19 de septiembre, la primera de ellas, debido a las restricciones sanitarias, con formato semi-presencial.

### ***2. NUEVOS ACADÉMICOS***

El 1 de junio tomó posesión como académico el Ilmo. Sr. D. Antonio J. Durán Guardado, catedrático de Análisis Matemático de la Universidad de Sevilla.

El 21 de abril tomó posesión como académica la Ilma. Sra. D<sup>a</sup>. Montserrat Vilà Planel·la, profesora de Investigación de la Estación Biológica de Doñana (Consejo Superior de Investigaciones Científicas).

El 3 de octubre tomó posesión como académico el Ilmo. Sr. D. Pedro Jordano Barbudo, profesor de Investigación del Departamento de la Estación Biológica de Doñana (Consejo Superior de Investigaciones Científicas).

### ***3. ACTOS SOLEMNES***

#### ***Acto de apertura del curso 2022-2023***

El acto solemne de apertura de curso se celebró el día 12 de diciembre en la Facultad de Física. Fue presidido por el académico Javier Fernández Sanz, en representación del presidente, Excmo. Sr. D. José Luis de Justo Alpañés. Tras la lectura de la memoria del curso 2021-2022 por parte del secretario, intervino el Ilmo. Sr. D. José Luis Huertas Díaz, quien pronunció la conferencia inaugural, titulada “El lado oscuro de las TIC”.

#### 4. CURSOS Y SIMPOSIOS

La Academia, en colaboración con la Facultad de Química de la Universidad de Sevilla, organizó un ciclo de conferencias sobre “Historia y Filosofía de la Ciencia y de la Técnica”, en memoria del profesor Ramón Queraltó Moreno. Las conferencias impartidas durante 2022 fueron las siguientes:

- 14 de marzo: “La marquesa de Châtelet y el fuego”. Profesor D. Antonio Roselló Segado.
- 21 de marzo: “Ciencia y religión en la Francia de la Ilustración”. Profesor D. Juan Arana Cañedo-Argüelles.
- 28 de marzo: “¿Logos sin mito? sobre las ciencias y las religiones”. Profesor D. José Manuel Ferreirós Domínguez.
- 4 de abril: “La disyuntiva cosmogónica en el pensamiento religioso egipcio y hebreo, y su pervivencia en la cosmología física actual”. Profesor D. Francisco Soler Gil.
- 18 de abril: “El misterio de “las mesas giratorias”. Polémica entre ciencia, iglesia y espiritismo en la España del siglo XIX”. Profesor D. Javier Almarza Madrera.
- 25 de abril: “La Real Sociedad Patriótica de Sevilla y el Laboratorio de Química de 1784”. Profesor D. Manuel Castillo Martos.
- 9 de mayo: “Religión y ciencia: ¿Coexistencia, complementariedad, convergencia o conflicto?”. Profesor D. Agustín García Asuero.
- 16 de mayo: “Entropía, información y cibernética”. Profesor D. Javier Aracil Santonja.

#### 5. OTRAS ACTIVIDADES

##### *Martes de la Academia*

Este año se ha reanudado el ciclo habitual de “Los Martes de la Academia”, organizado en colaboración con el Excmo. Ateneo de Sevilla. Las fechas, títulos y autores de las conferencias impartidas fueron los siguientes:

- 11 de enero, Juan Cornejo Suero: “El fascinante e ignorado mundo que pisamos”.
- 1 de marzo, Miguel García Guerrero: “Ciencia para y con la sociedad”.
- 8 de marzo, Agustín Rodríguez González-Elipe: “Tras el rastro de la invisibilidad: átomos, trazos y palabras”.
- 15 de marzo, José Luis Huertas Díaz: “La piedra angular de las TIC”.
- 22 de marzo, Alfonso Jiménez Martín: “Los diagramas científicos de Isidoro de Sevilla y el escudo de la Real Academia Sevillana de Ciencias”.
- 10 de mayo, Luis Narváez Macarro: “Un recorrido por las Matemáticas a través del número pi”.

- 
- 18 de octubre, Antonio Gómez Expósito: “Power to the people”.
  - 15 de noviembre, Montserrat Vilà Planella: “Cambio ambiental en la cuenca mediterránea”.

### ***Ciclo de conferencias científicas correspondientes al convenio con la Fundación Cajazol 2022***

Se celebró en la sala Salvador de la Fundación Cajazol, en las siguientes fechas, con los siguientes títulos y por los siguientes ponentes:

- “El futuro del almacenamiento de energía: baterías de litio y más allá”, celebrada el 15 de septiembre de 2022, a cargo de José Luis Tirado Coello.
- “El hidrógeno verde”, celebrada el 22 de septiembre de 2022, a cargo de Javier Brey Sánchez.
- “Mercados y precios de la luz: ¿Quo vadis?”, celebrada el 6 de octubre de 2022, a cargo de Pedro Linares Llamas.
- “La energía nuclear en la encrucijada europea”, celebrada el 13 de octubre de 2022, a cargo de Manuel Lozano Leyva.

### ***Ciclo de conferencias interacadémicas sobre energía y medio ambiente***

Se celebró en la Universidad de Málaga el 30 de mayo de 2022. La Academia participó activamente en la sesión 2 sobre “Sostenibilidad de ecosistemas naturales y urbanos”, con el siguiente programa:

- “Introducción (I)”, por José Luis de Justo Alpañés.
- “Introducción (II)”, por Fernando Orellana Ramos.
- “Sostenibilidad de los ecosistemas naturales”, por Francisco García Novo.
- “Ingeniería de datos aplicada a la sostenibilidad urbana”, por Rafael Morales Bueno.

### ***Premios a Investigadores Jóvenes 2019***

Con fecha 26 de mayo, tuvo lugar el solemne acto de entrega de los Premios a Investigadores Jóvenes 2019 en el salón de actos de la Real Maestranza de Caballería de Sevilla.

Los premiados fueron los siguientes:

- Premio Investigador Joven de la Real Academia Sevillana de Ciencias: D. Antonio Franconetti García, por sus investigaciones en el área de la Química Supramolecular.

- Premios Investigador Joven de la Real Maestranza de Caballería: D. Gonzalo Millán Zambrano, por sus investigaciones en Biología sobre los mecanismos de la expresión génica en células eucariotas, y D. Alberto Jiménez Solano, por sus investigaciones en Física en el campo de la Nanofotónica.

## **6. PREMIOS Y HONORES**

Con fecha 10 de octubre, se hizo entrega de una de las medallas de la Real Sociedad Matemática Española, como parte de los Premios RSME-Fundación BBVA, al académico numerario D. Luis Narváez Macarro.

## **7. OTROS ASUNTOS**

- El Instituto de Academias de Andalucía ha emitido con fecha 4 de octubre de 2022 un “Manifiesto por la Paz”, al que se han adherido unánimemente todas las academias andaluzas, entre las cuales se encuentra la nuestra.
- El pasado 21 de junio falleció en Sevilla el Prof. José Luis Vicente Córdoba, catedrático de Álgebra de la Universidad de Sevilla y académico numerario, uno de los tres fundadores de la sección de Matemáticas. Esta Academia le dedica un emocionado recuerdo.
- El pasado 16 de septiembre falleció en Sevilla el Prof. Rafael Infante Macías, catedrático de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad de Sevilla y académico numerario. Igualmente, esta Academia le dedica un emocionado recuerdo.
- Se han vuelto a convocar los “Premios para Investigadores Jóvenes”, edición 2022. De acuerdo con las normas, el concurso será resuelto por un jurado compuesto por un presidente y seis vocales, designados todos ellos por la Academia y la resolución será aprobada en Junta General. El fallo será inapelable y se hará público antes del 31 de diciembre de 2022.
- El presidente de la Academia, en su calidad de tal, ha escrito varios artículos publicados en Diario de Sevilla en 2022, en las siguientes fechas y con los siguientes títulos:
  - 3.1.2022: “De las inundaciones del Ebro a la presa de Melonares”.
  - 11.1.2022: “El Estado financió a 30 años sólo la cuarta parte de la línea 1 del metro” (publicado en ABC de Sevilla).
  - 20.2.2022: “Los expertos defienden el proyecto de los túneles para la SE-40”(publicado en ABC de Sevilla).
  - 4.4.2022: “La gripalización de la COVID-19”.



- 
- 4.7.2022: “Mi experiencia de la COVID-19”.
  - 25.10.2022: “La sequía, las crecidas y la España vaciada”.

### ***Agradecimientos***

Durante el año 2022, como viene siendo habitual, la Real Academia Sevillana de Ciencias ha recibido el soporte físico de las cuatro Facultades de Ciencias de la Universidad de Sevilla, donde ha desarrollado sus actividades. Este patrocinio universitario es reconocido por la Academia, que agradece una vez más al Excmo. Sr. rector y a los Sres. decanos y directores de departamentos implicados, su apoyo continuo y las facilidades dadas para el uso de instalaciones y locales.

El Secretario,  
Enrique Fernández Cava



## ***DISCURSOS***



## ***EL TRANSISTOR COMO PIEZA ANGULAR DE LAS TIC: LUCES Y SOMBRAS***

*Discurso pronunciado por el  
Ilmo. Sr. D. José Luis Huertas Díaz,  
académico de número de la  
Real Academia Sevillana de Ciencias  
el día 12 de diciembre de 2022*

Resumen fusionado de las dos conferencias impartidas a lo largo del año 2022 tituladas: “*El lado oscuro de las TIC*” (pronunciada en el acto inaugural del curso académico 2022-2023, el 12 de diciembre de 2022, en la Facultad de Física de la Universidad de Sevilla) y “*La piedra angular de las TIC*” (dictada dentro del ciclo “Los martes de la Academia” en el Ateneo de Sevilla), el 15 de marzo de 2022.

Actualmente nadie puede poner en duda la importancia capital que las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) han adquirido. La penetración social llega desde la infancia a la senectud, basándose en el empleo universalizado de los teléfonos inteligentes y otros dispositivos electrónicos móviles y portables. Con ellos, el empleo de Internet como medio y soporte de comunicación se ha extendido por todos los rincones del planeta en mayor o menor grado. De esta forma, hemos acelerado el largo camino emprendido milenios atrás del intercambio de ideas e información entre seres humanos haciendo posible y sencillo que dicho intercambio sea independiente de la distancia entre los comunicantes y dotándolo de propiedades antes inimaginables. Ahora podemos intercambiar *cualquier* tipo de información desde *cualquier* lugar, en *cualquier* momento y, prácticamente, para manipularlo como queramos. Esto se ha conseguido a través de la convergencia de dos elementos que nos han preocupado desde los albores de la civilización: el lenguaje y el cálculo. Es decir, por el desarrollo de nuestra facultad de comunicación –extendiéndola a distancias más o menos grandes por medios “artificiales”, señales de humo o sonoras, telefonía, radio, etc.– y de nuestra facultad de calcular –usando procedimientos o máquinas más o menos sofisticadas, desde el ábaco a las calculadoras mecánicas–.

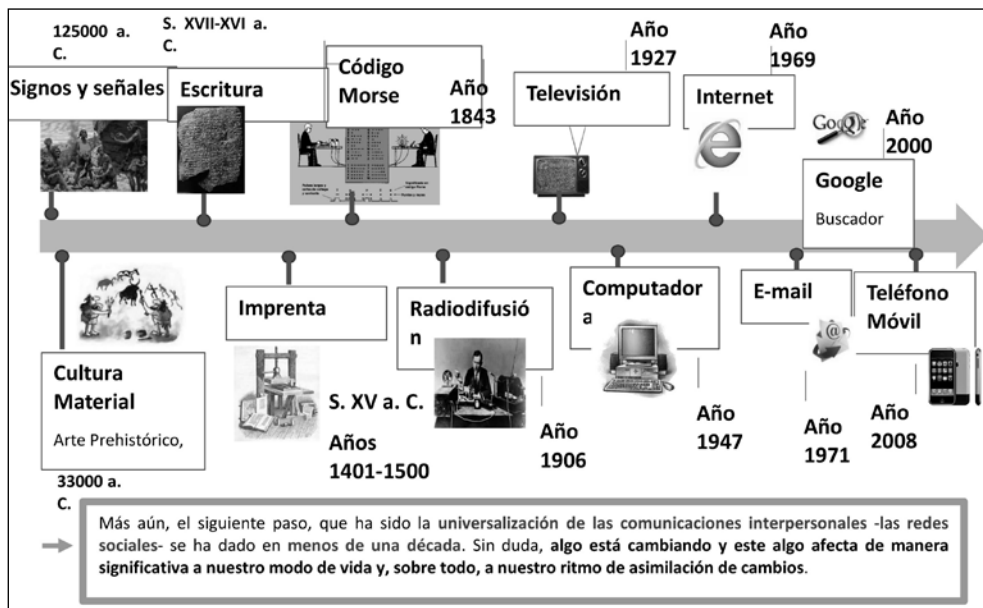
Esta convergencia entre comunicación y cálculo se traduce hoy día en que todos nuestros dispositivos de comunicación son, a su vez, dispositivos de cómputo. Quien tiene un i-phone tiene en realidad un potente computador en su bolsillo.

En este trabajo vamos a tratar de detallar algunas consideraciones relativas a ese mundo digital que nos ha cambiado casi sin darnos cuenta. Sobre todo, vamos a poner el foco en el componente electrónico que ha permitido este cambio: el *transistor*, de

cuya invención se han cumplido 75 años en diciembre pasado; intentaremos hacer un análisis simplificado de su operación y funcionamiento, nos plantearémos su impacto en los sistemas electrónicos actuales y trataremos de dar una visión crítica sobre su futuro. Finalmente, comentaremos algunos aspectos negativos de esta evolución de las TIC.

Comenzaremos por apuntar el aspecto más significativo de este fenómeno evolutivo, su velocidad. La Figura 1, pretende ilustrarlo, representando los intervalos de tiempo transcurridos desde que se han ido produciendo ciertos hitos culturales y han sido aceptados y asimilados por la sociedad. Obsérvese el largo lapso que fue necesario para extender el uso del alfabeto con el corto plazo que se ha precisado para universalizar el uso de los ordenadores. Han sido necesarios muchos milenios para llevar nuestra capacidad de comunicación a distancia hasta el rango de cientos de metros y sólo un siglo para pasar al de kilómetros. Y algo similar ha ocurrido con nuestra capacidad de hacer cálculos. Desde los primeros textos escritos en piedra hasta la imprenta transcurrieron cinco milenios, mientras que la popularización de las impresoras digitales se ha hecho en unos pocos decenios.

FIGURA 1



El soporte científico–tecnológico que ha permitido esta evolución es la Electrónica, una ciencia con una historia relativamente corta, puesto que comienza a cobrar cuerpo de doctrina científica a partir de finales del siglo XIX, con el descubrimiento de una partícula cargada negativamente, el electrón (J. J. Thompson, 1897), y una serie de fenómenos asociados a él. Años antes, a lo largo de ese mismo siglo, se habían estudiado

distintos fenómenos que terminaron relacionados con esa partícula de una u otra forma, así como se habían inventado ciertos dispositivos y máquinas cuyo fundamento resultó también estar basado en esa partícula submicroscópica. En esos años se introducen el telégrafo, el teléfono y la radio, así como se estudia el paso de un fluido por entonces de origen no conocido a través de ciertos componentes como las resistencias, los condensadores o las bobinas y también las perturbaciones que tienen lugar cuando ocurre ese flujo, lo que pronto se conocería como electromagnetismo.

Pero no es sino con el descubrimiento de que esos electrones pueden desplazarse también en el vacío, cuando se calienta un conductor (efecto termoiónico), que aparece el primer dispositivo propiamente electrónico: el triodo de vacío, debido a Lee De Forest (1907). Su importancia radicó en que permitió resolver un problema clave para el despliegue efectivo del primer sistema de telefonía fija al proporcionar amplificación, esto es, la capacidad de generar una copia de una señal dada, pero con un valor mayor de voltaje o de intensidad de corriente. Esto puede parecer una violación del segundo principio de la Termodinámica, pero en realidad no es así porque estas válvulas realizan esa operación partiendo de una tensión continua de polarización. De hecho, convierten potencia continua en esa operación de amplificar una señal de alterna.

Solventado el inconveniente que presentaban las líneas telefónicas debido a su longitud, lo que generaba pérdidas en las señales transmitidas que hacían imposible su recuperación y, por tanto, la comunicación, los sistemas telefónicos y, posteriormente, los de radio (que se veían afectados por un problema similar) proliferaron en unas pocas décadas, haciéndose populares en todo el planeta.

Esencialmente, un triodo de vacío consiste en tres electrodos dentro de una ampolla de vidrio en la que se ha hecho el vacío (ver Figura 2). Uno de ellos, el cátodo, se calienta para que pueda emitir electrones que son atraídos hacia una placa o ánodo. Pero su camino se ve dificultado por un tercer terminal (rejilla en la Figura), colocado entre ánodo y cátodo, que, de acuerdo con el potencial eléctrico que se le aplique permite pasar más o menos electrones. El conjunto actúa así como una válvula que permite regular la circulación de corriente. Si la rejilla se conecta a la señal eléctrica que se quiere amplificar, el paso de corriente desde el ánodo es una copia amplificada e invertida de la señal de rejilla.

Estas válvulas evolucionaron, añadiendo nuevos electrodos de control y sofisticando su operación, lo que dio como resultado una enorme expansión de las radiocomunicaciones (incluida la radio comercial) y de otras aplicaciones como la telefonía a grandes distancias. Así como el comienzo de la televisión. Esto ocurrió en un lapso de dos décadas que cubre hasta el estallido de la Segunda Guerra Mundial. En ella se hizo un uso extensivo e intensivo de la Electrónica de la época y, haciendo corta una larga historia, se planteó que el empleo de los dispositivos de vacío resultaba una gran ayuda logística pero también eran inadecuados debido a su consumo de potencia, su peso y volumen y su fragilidad. Ello limitaba su utilidad sobre todo en aviónica y, en general, en sistemas embarcados. La conclusión general era que se hacía imprescindible buscarles un sustituto.

FIGURA 2



La Segunda Guerra Mundial significó, en efecto, una aceptación generalizada de la Electrónica por parte de ambos bandos, así como un convencimiento de su importancia en temas estratégicos, mucho más allá que en las aplicaciones de uso civil. Sin embargo, también demostró sus carencias y limitaciones. El tamaño de los equipos electrónicos de la época, su excesivo peso, su enorme consumo de energía, su alta fragilidad y baja fiabilidad, provocaban la frustración de ver que no eran capaces de atender adecuadamente a las expectativas que generaban.

Baste un ejemplo para entender el alcance de lo que decimos. Una superfortaleza volante de la época, los conocidos bombarderos B-52 de la Fuerza Aérea norteamericana, llevaba unas 1.000 válvulas lo que significaba un consumo de aproximadamente 10 kilovatios y una carga extra debida a la electrónica embarcada de 1 tonelada; a eso debemos añadir que la tasa de fallos venía a ser de 1 hora, lo que implicaba varios problemas en cada misión. Estaba claro, además, que añadir más funcionalidad implicaba empeorar esas figuras de mérito.

Esto se hizo aún más evidente con el desarrollo del primer computador electrónico, el ENIAC, que se terminó de construir en 1946\*. Se hacía difícil pensar, por ejemplo, en la posibilidad de ubicar un ordenador a bordo de una aeronave. A menos que se diese un cambio drástico de paradigma.

Esto condujo a plantear la necesidad de recurrir a otras alternativas que aliviaran estos problemas. Los dispositivos basados en el transporte de electrones en el vacío contaban con prestaciones interesantes que se habían traducido en aplicaciones muy demandadas; pero era imprescindible buscar dispositivos que tuvieran una funcionali-

\* En total, en la construcción de ENIAC se utilizaron 17,468 válvulas electrónicas, 7,200 diodos, 1,500 relés, 70,000 resistencias y 10,000 condensadores, con un peso total de 27 toneladas y un consumo energético de 150 KW.



dad similar a las de las válvulas, pero se basaran en otros mecanismos de conducción y control que, ante todo, redujeran las figuras de gasto energético.

Afortunadamente, existían precedentes de investigaciones sobre el empleo de mecanismos alternativos. Por ejemplo, los primeros detectores de radio –en esencia, diodos– estaban basados en el uso de cristales de galena, es decir, de sulfuro de plomo; un conductor selectivo que ofrece una resistencia pequeña al paso de corriente eléctrica en un sentido y una gran resistencia cuando se cambia la polaridad.

Mucho más interesantes resultaron ser los trabajos llevados a cabo, independientemente, por Julius E. Lilienfeld y Oskar Heil. El primero, que realizó parte de su carrera en Alemania para luego emigrar a Estados Unidos, inventó el condensador electrolítico y, posteriormente, entre 1920 y 1925, patentó en Canadá una serie de ideas que no son sino el primer componente electrónico basado en el empleo de un semiconductor. Lilienfeld no pudo llevar a la práctica sus ideas debido a que la tecnología del momento no permitía conseguir cristales con las condiciones necesarias de pureza o impurificación. De ahí que esta vía quedara en el olvido durante veinte años. Posteriormente, en 1935, el alemán Oskar Heil consiguió otra patente en Reino Unido que describía un elemento que hoy llamaríamos transistor, que no llegó a realizarse en la práctica. Tanto Lilienfeld como Heil se vieron obligados a emigrar fuera de Alemania, aunque por razones muy distintas y en momentos muy diferentes.

Nada más concluida la guerra, Bell Labs, en Estados Unidos, crea un grupo de investigación específicamente constituido para llegar a encontrar el grail electrónico, un nuevo dispositivo que no precisara de calentamiento para funcionar. El líder designado fue W. Shockley, un físico con conocimientos sobre conducción en sólidos, cuya idea era intentar aprovechar los mecanismos de conducción en sólidos semiconductores, un campo entonces de total novedad, que comenzó a desarrollarse en la década de los treinta.

Seguramente inspirados por las ideas de Lilienfeld, tres componentes del grupo – John Bardeen, Walter Brattain y el propio líder, William Shockley– decidieron explorar las opciones que los materiales semiconductores podían ofrecer a la Electrónica.

En esencia, un semiconductor es cualquiera de los elementos de la Tabla Periódica de número de valencia 4 –germanio o silicio, por ejemplo–, así como numerosas sustancias compuestas formadas combinando esos mismos materiales con elementos de valencia 3 y 5. Los mecanismos de conducción son más elaborados que los de conducción por efecto termoiónico y, para ser entendidos, precisaron del avance de una rama de la Física y de la Química que hoy llamamos Estado Sólido. En realidad, semiconductores como el germanio o el silicio no presentan propiedades realmente interesantes desde la perspectiva de la conducción eléctrica, sino que se comportan como malos aislantes. Las cosas cambian cuando cualquiera de estos materiales contiene un número determinado de impurezas de otro material –normalmente del grupo III ó V del sistema periódico–. Por ejemplo, supongamos un cristal de germanio ligeramente impurificado con fósforo<sup>1</sup>.

---

1. Es interesante hacer notar que la proporción de impurezas debe ser tan baja como para que la estructura cristalina del material no cambie. Una impurificación de un átomo de fósforo por millón de átomos de germanio es suficiente para provocar ese cambio en las propiedades eléctricas.

En ese caso, las propiedades eléctricas del conjunto sufren una alteración importante; si, además, ponemos en contacto este cristal con otro –también de germanio– impurificado, por ejemplo, con boro, nos encontramos con que el conjunto puede operar como un diodo.

Volviendo atrás en el tiempo, la conducción en sólidos empezó a atraer la atención de los físicos a finales de 1920. La visión que hasta entonces se había tenido cambió con la ayuda de los avances en mecánica cuántica. La vieja idea de que los electrones se comportaban como un gas confinado entre las paredes del metal<sup>2</sup> se abandonó a favor de un modelo cuántico en el que los electrones ocupaban todos los niveles de energía disponibles hasta el valor llamado nivel de Fermi<sup>3</sup> y sólo unos pocos poseían valores superiores. Esta nueva visión se debía a diversos físicos europeos: Enrico Fermi, Wolfgang Pauli, Arnold Sommerfeld y Paul Dirac, fundamentalmente.

En *Bell Labs*, Karl Darrow hizo suyo el modelo y publicó una extensa revisión de estas ideas en la revista de la institución, el *Bell System Technical Journal*. Este artículo impulsó a distintos investigadores a reconsiderar el efecto termoiónico. Eran los tiempos de la *Gran Depresión* y *Bell Labs* había decidido reducir la jornada laboral de seis a cuatro días, evitando despedir a tanto talento como acumulaba. Esto dio la oportunidad a muchos de sus investigadores a mejorar su formación aprovechando esos días libres. En particular, Brattain<sup>4</sup> aprovechó un curso de verano dado por Sommerfeld en la universidad de Michigan en 1931 para profundizar en los conceptos novedosos de la mecánica cuántica. Con este nuevo bagaje, Brattain y su entonces jefe en *Bell Labs*, Joseph Becker, abordaron el estudio teórico de un curioso dispositivo, el rectificador de cobre y óxido de cobre, que se estaba considerando como alternativa a los diodos de vacío.

El problema se reveló apasionante, las incógnitas eran muchas. ¿Cómo actuaba el dispositivo?, ¿a qué mecanismos de conducción obedecía?, ¿por qué sólo ciertos tipos de cobre podían emplearse para lograr el efecto rectificador?<sup>5</sup> A finales del año 1933, un año crucial para la historia<sup>6</sup>, Becker y Brattain llegaron a la conclusión de que, fuera cual fuera el mecanismo de conducción, el fenómeno sólo tenía lugar en la frontera entre las dos capas –la de cobre y la de óxido–. Sin embargo, Walter Schottky<sup>7</sup>, trabajando para Siemens-Schuckert en Alemania, se les adelantó a publicar ese resultado. Este tipo de uniones –entre metal y óxido– habría de tener una importancia capital.

En realidad tanto Schottky como Brattain estaban estudiando un tipo de materiales que se había comenzado a llamar por algunos físicos “*semiconductores*”. Además del

---

2. Se pensaba que este gas electrónico estaba compuesto por una multitud de electrones libres que se movían sin orden ni concierto y podían tener cualquier valor de velocidad y energía.

3. El nivel de Fermi depende de la temperatura a la que se encuentre el metal y sirve como referencia para el estudio de los materiales.

4. Brattain comenzó a trabajar para *Bell Labs* el 1 de agosto de 1929, en plena depresión económica.

5. Sólo el cobre proveniente de ciertas minas en Chile servía a los efectos de este dispositivo.

6. Fue el año de la ascensión al poder de Hitler en Alemania.

7. Posteriormente, Schottky investigaría exhaustivamente las uniones metal-semiconductor, llegando a la conclusión que no todas presentan ese carácter rectificador.

rectificador de cobre-óxido, el selenio entraba en esa categoría. Se trata de sustancias que no pueden clasificarse ni como aislantes ni como conductoras de electricidad. Hasta cierto punto, su resistencia decrece con la temperatura, lo que es diametralmente opuesto al comportamiento típico de un conductor. Además, se trata de materiales muy sensibles a la luz, que puede provocar diferencias de potencial entre superficies iluminadas y no iluminadas del mismo cristal.

Fue un físico inglés, Alan Wilson quien, en 1931, durante una estancia en el instituto de Heisenberg, en Leipzig, hizo un descubrimiento interesante. Basándose en trabajos de dos estudiantes de ese instituto, Felix Bloch y Rudolf Peierls, que habían postulado la idea de la existencia de *bandas* de energía<sup>8</sup> o niveles energéticos que los electrones pueden tener –o les pueden estar *prohibidos*– dentro de un cristal, Wilson se dio cuenta de que había una diferencia esencial entre conductores y aislantes. Los primeros forman cristales en los que el enlace químico deja electrones libres en la banda de mayor energía o más externa –denominada *Banda de Conducción*–, mientras que los segundos tienen a todos sus electrones externos ocupados en satisfacer las condiciones de sus enlaces (normalmente *covalente*) dentro de la denominada *Banda de Valencia*.

Wilson resumió sus ideas en dos trabajos publicados en 1931 y en un seminario ofrecido en Leipzig. Al principio fueron muy combatidas, pero enseguida pasaron a ser aceptadas, en parte porque podían explicar que los semiconductores eran una clase diferente de materiales. En efecto, Wilson probó que los niveles energéticos de los átomos de un cristal daban lugar a un desdoblamiento en bandas de energía que podían estar ocupadas por los electrones y estaban separadas entre sí por niveles que no podían ser ocupados. La diferencia entre aislantes y semiconductores residiría en que la banda prohibida entre las bandas de valencia y conducción<sup>9</sup> era de un valor más pequeño en los semiconductores, dando lugar a que la probabilidad de que un electrón “saltara” de una banda a otra no fuera cero.

Más aún, en su segundo trabajo, Wilson apuntó que la presencia de impurezas hace que crezca mucho la conductividad de un semiconductor porque estas imperfecciones dan lugar a la aparición de niveles energéticos localizados dentro de la banda prohibida, lo que incrementa la probabilidad de salto al requerirse menos energía para que un electrón lo pueda llevar a cabo.

Estaba naciendo una nueva ciencia dedicada a estudiar –en una primera fase– la conducción en sólidos. Sin embargo, eran tiempos de crisis política; numerosos científicos alemanes, de origen judío, iniciaron un éxodo hacia Estados Unidos del que se beneficiaron sobre todo instituciones como MIT o la universidad de Princeton, muy cercanas geográficamente a *Bell Labs*. Algunos directivos de estos laboratorios decidieron que valía la pena orientar recursos a esta nueva rama. En particular, el director de

8. Estas bandas están estrechamente relacionadas con los niveles de energía discretos que la mecánica cuántica ha demostrado que existen en un átomo aislado.

9. La *Banda de Conducción* es la más externa, es decir, la de mayor energía y la *Banda de Valencia*, responsable del enlace químico, es la que le sigue inmediatamente. Ambas bandas están separadas por una banda de energía prohibida, que corresponde a valores energéticos que no pueden ser ocupados por los electrones.

investigación, George Buckely prestó oídos a las ideas de Mervin Kelly, un doctor en físicas que, en 1936, dirigía el laboratorio de válvulas electrónicas. Kelly acariciaba la idea de sustituir las válvulas por componentes de estado sólido –basados en cristales semiconductores– que realizaran las mismas funciones sin las penalizaciones de energía, tamaño, fiabilidad, etc, a las que ya hemos hecho referencia.

En la década de los treinta del siglo pasado, esa emigración desde Europa ayudó a equilibrar los niveles de investigación en Física a ambos lados del océano Atlántico. Sin embargo, entre las dos orillas se mantenía una diferencia significativa. Nos referimos al énfasis dado en Estados Unidos al carácter aplicado de cualquier nuevo descubrimiento. Esto llevó a que importantes teóricos europeos desecharan el estudio de las propiedades del estado sólido a favor de campos más exóticos como, por ejemplo, la estructura del núcleo atómico.

Como hemos dicho, Mervin Kelly empezó a preparar el camino para que Bell Labs estudiara en profundidad qué hacer con los semiconductores. En 1936, la industria norteamericana comenzó a levantar la congelación que pesaba sobre las contrataciones de personal. En Bell Labs el primer doctor en Física reclutado fue precisamente Shockley, quien fue destinado por Kelly a un grupo separado de los demás y centrado en los nuevos materiales semiconductores. Shockley había defendido una tesis doctoral sobre el cálculo de bandas de energía en el cloruro sódico.

En diciembre de 1939, Shockley anotó sus primeras ideas sobre un amplificador basado en el uso de un semiconductor pero, incluso con la ayuda de Brattain, no fue posible llegar a ningún resultado práctico.

Entretanto, Brattain estaba haciendo progresos con sus investigaciones sobre el silicio. Motivado por el trabajo empírico de Russell Ohl, Brattain comenzó a estudiar la barrera de potencial eléctrico que se establece de manera espontánea cuando dos semiconductores “diferentes” se ponen en contacto. Gracias a un error providencial al crecer un cristal de silicio y cortarlo para tener una oblea de ese material, Brattain llegó a descubrir que –aparentemente– la clave estaba en que una de las partes fuera pura y la otra contuviera “cierta suciedad”. Sin duda era un inicio prometedor.

Pero corría el verano de 1940, la guerra había estallado en Europa y los laboratorios de investigación fueron llamados a atender las demandas de la Defensa. Pronto se crearon sendos comités científicos en Gran Bretaña y Estados Unidos que coordinaron las investigaciones que consideraban estratégicas. La mayor parte de los recursos se destinaron así al esfuerzo bélico; en Bell Labs, más de la mitad del potencial humano se dedicó a los sistemas y componentes de radar. Tanto Shockley como Brattain dedicaron su tiempo a desarrollos relacionados con esta nueva técnica. Especialmente el primero estuvo involucrado hasta 1945 en proyectos militares en Washington, contribuyendo, por ejemplo, a un nuevo sistema electrónico de puntería basado en radar para las superfortalezas B-52.

---

10. Un semiconductor es de tipo N cuando está impurificado con átomos que pueden “donar” o “ceder” electrones; esto genera un exceso de carga negativa disponible en el semiconductor sin alterar

Pero no toda la investigación sobre semiconductores se detuvo durante este período. Se habían encontrado técnicas para producir silicio impurificado de tipo N y de tipo P<sup>10</sup>. Esto había permitido cierto avance en el estudio de las uniones P-N, formadas al poner en contacto íntimo un material de tipo N con otro de tipo P. En Bell Labs eran conscientes de la importancia de esos estudios, una prueba es el hecho de que Kelly, como director de investigación en esos años, prohibiera cualquier charla técnica sobre el tema fuera de los propios laboratorios.

No obstante, no era el único lugar en Estados Unidos donde se seguía avanzando en desentrañar qué pasaba en un semiconductor; en Rad. Lab.<sup>11</sup> y en las universidades de Pensilvania o Purdue se consideraron aspectos diferentes. En 1942, por ejemplo, Frederick Seitz y otros colegas de Pensilvania eran ya capaces de alterar las propiedades eléctricas del silicio “dopándolo”<sup>12</sup> con otros materiales como boro, berilio, aluminio o fósforo. Y ese mismo año, investigadores de Purdue y de General Electric comenzaron a fabricar cristales rectificadores empleando germanio.

El final de la guerra en Europa supuso una vuelta a la actividad normal en Bell Labs. Un regreso relativo, ya que Kelly tenía ahora ideas mucho más claras sobre la importancia de explorar los materiales semiconductores como alternativa a las válvulas electrónicas. Aprovechando el impulso a la investigación científica que Bush<sup>13</sup> había pedido y conseguido del presidente norteamericano, en Bell Labs decidieron crear tres grandes grupos en el que se incluyeron numerosos científicos de prestigio que habían probado anteriormente su valía dentro de la institución. Como hemos dicho, Shockley fue designado, junto con el químico Stanley Morgan, para dirigir el grupo que debería dedicarse a la Física del Estado Sólido. Brattain fue asignado a ese mismo grupo y todos se trasladaron a un nuevo laboratorio en Murray Hill, Nueva Jersey.

En marzo de 1945, Kelly llevó a Shockley a las instalaciones de Bell Labs en Holmdel, Massachusetts, a visitar a Russell Ohl, un viejo conocido de ambos y de Brattain. Ohl llevaba trabajando desde antes de la guerra en las propiedades ópticas de los semiconductores, con miras a sacarles partido en comunicaciones de alta frecuencia. Ohl, como antes Edison o De Forest, era ante todo un experimentalista y les mostró unos

---

su neutralidad macroscópica. Estas impurezas pueden ser de cualquier elemento de la columna V del sistema periódico, por ejemplo, de fósforo. El caso simétrico es el tipo P, en el que se han introducido impurezas formadas por átomos capaces de “captar” electrones, lo que genera un déficit de carga negativa que puede interpretarse como exceso de carga positiva. Los elementos de la columna III del sistema periódico son de este tipo; un caso muy usado es el boro.

11. El Radiation Laboratory fue un laboratorio ubicado en MIT, sufragado con dinero privado, que funcionó entre octubre de 1940 y diciembre de 1945. Estuvo bajo el control del National Defense Research Committee (NDRC), y posteriormente de su sucesora, la Office of Scientific Research and Development (OSRD), ambas organizaciones presididas por Vannevar Bush, de quien ya hemos hablado en el capítulo 5. Es interesante hacer notar la importancia estratégica concedida a la investigación científica en esos años.

12. Dopar es la manera técnica de referirse a impurificar un semiconductor.

13. Vannevar Bush dirigió a Harry Truman un memorándum titulado “Ciencia: la Frontera Sin Fin”, en el que resumía la importancia vital que el trabajo de innumerables científicos había tenido en la consecución de la victoria y proponía continuar con ese esfuerzo en el futuro.

dispositivos formados por una capa conductora entre dos capas de silicio, que permitían un cierto control de la corriente que atravesaba el conjunto. Sin embargo, Ohl no era capaz de interpretar qué estaba pasando en ese sistema, que sufría de inestabilidades térmicas que lo hacían poco útil.

Pero para Shockley fue una motivación adicional. Él tenía que ser capaz de encontrar la manera en que se pudiera construir un verdadero amplificador con esos cristales. Un mes más tarde se puso a trabajar en diferentes opciones de dispositivo que no eran sino variantes del componente ideado por Lilienfeld años antes. Su idea era inducir una capa de carga negativa en la superficie de un cristal semiconductor de tipo P, usando un campo eléctrico externo. En junio tuvo que darse por vencido y reconocer que sus esfuerzos estaban siendo inútiles: había que buscar otro camino.

La reorganización de la investigación en Bell Labs mantuvo ocupado a Shockley hasta septiembre de ese año. En esa fecha ya tenía formado el equipo humano con el que él se concentraría personalmente en semiconductores. Eligió a los físicos Brattain y Gerald Pearson, así como a Hilbert Moore, un experto en electrónica. A ellos se añadió algo más tarde el químico Robert Gibney. Pero Shockley quería con él a un joven brillante, con quien había trabado conocimiento años antes cuando terminaba su tesis en MIT. Finalmente, el 15 de octubre de 1945, Bardeen se unió al grupo.

Una semana más tarde, Shockley le proponía a Bardeen su primera tarea: estudiar el “efecto campo” con el que él había fracasado en obtener el amplificador que buscaba. En marzo de 1946, Bardeen explicó las razones por las que Shockley no había tenido éxito, postulando la existencia de “estados superficiales”, es decir de carga atrapada muy cerca de la superficie que impedía que el campo eléctrico penetrara lo que estaba calculado macroscópicamente. Pero unos días después se planteaba en una nota recogida en su cuaderno de campo: “quizá pueda detectarse el fenómeno en germanio”.

Ese material, el germanio, era el otro semiconductor extensamente estudiado durante la guerra por uno de los grupos de la universidad de Purdue, el dirigido por Karl Lark-Horovitz. La sugerencia de Bardeen hizo que todo el grupo de Shockley se focalizara en el estudio de la física de las superficies considerando tanto silicio como germanio. Este interés fue llevando a sucesivos hallazgos y a diversos ensayos experimentales que permitieron evidenciar, durante el invierno de 1946-47, la existencia de esos estados superficiales sugeridos por Bardeen. Lo más importante es que Brattain y Gibney, a mitad de noviembre de 1947, habían conseguido encontrar la manera de evitar el efecto de bloqueo que los estados superficiales de energía provocaban, impidiendo que las ideas de Shockley sobre cómo realizar el control del flujo de carga fueran efectivas. El camino quedaba expedito para llegar al transistor.

Bardeen tuvo otra idea brillante y acudió al despacho de Brattain para probarla. En efecto, usando una punta de metal rodeada por un electrolito, todo ello en contacto con silicio, consiguieron cambios en el flujo de corriente cuando aplicaron un campo eléctrico. Comenzaban cuatro semanas de frenética actividad.

Sin embargo, las pruebas estaban todavía lejos de dar el resultado que buscaban. Básicamente había dos importantes problemas a resolver. Por una parte, que era posible conseguir amplificar la intensidad, pero no el voltaje, lo que limitaba las posibles pres-

taciones; de otra, todos sus experimentos funcionaban a frecuencias muy bajas, menores de 10 Hz, lo que haría inútil cualquier dispositivo, ya que las frecuencias de transmisión usadas en radio, televisión, radar, etc eran muy superiores, al menos miles de veces superiores.

Con todo, no se perdió el entusiasmo en los laboratorios de Holdem. Se acercaban las navidades y existía el convencimiento de que podrían tomarse las vacaciones después de haber logrado algo significativo. El 8 de diciembre, después del almuerzo, Brattain y Bardeen probaron con un cristal de germanio tipo N que encontraron. Esta vez consiguieron un duplicar el voltaje de salida y un efecto multiplicativo sobre la potencia eléctrica de unas 330 veces.

Pero, para sorpresa de ambos, lo habían conseguido aplicando al electrodo de control un voltaje negativo en lugar de positivo como cabía esperar. ¿Qué estaba pasando?

Continuando estas experiencias, el 12 de diciembre, al preparar cuatro muestras de germanio, Brattain cometió un error de novato: limpió con agua las muestras, eliminado así el óxido de germanio que debía actuar como aislante<sup>14</sup>; con ello, el metal que formaba el electrodo de control entró en *contacto directo* con el semiconductor. En contra de lo que pensaban hasta ese momento, se conseguía una cierta amplificación en tensión –aunque no en la potencia– pero de manera que entre 10 y 10.000 Hz era independiente de la frecuencia.

Los resultados requerían una nueva interpretación teórica, que Bardeen estaba en condiciones de dar. Hasta ese momento todos los esfuerzos del equipo habían estado orientados a los portadores mayoritarios<sup>15</sup> del material y a modificar su número por medio de un campo eléctrico externo; sin embargo, este giro inesperado hizo que Bardeen comenzara a tener en cuenta el papel de los portadores minoritarios. Este cambio de perspectiva resultaría crucial. Hasta ese momento las ideas que manejaban no eran muy diferentes de las que habían inspirado a Lilienfeld y a Heil; en ambos casos el transporte de corriente entre los dos extremos del semiconductor polarizado era cosa de los portadores mayoritarios<sup>16</sup>. Sin embargo, para explicar lo que estaba sucediendo, Bardeen tuvo que recurrir a los minoritarios. Sin ellos, lo que estaba midiendo no tenía razón de ser.

Finalmente, el 16 de diciembre pusieron en práctica una nueva idea: cortaron por la mitad el metal manteniendo las puntas resultantes a un par de milímetros de distancia. Usando así dos electrodos de oro conectados muy próximos sobre la superficie de un cristal de germanio de tipo N, observaron finalmente una amplificación significativa a 1

14. El óxido de germanio es soluble en agua, cosa que Brattain sabía de sobra.

15. En un semiconductor “puro” el número de electrones y de “huecos” –posiciones disponibles para ser ocupadas por un electrón– ha de ser el mismo como consecuencia de la neutralidad eléctrica del material a nivel microscópico. Cuando se impurifica un semiconductor hay o bien más electrones que huecos –caso de un semiconductor de tipo N– o más huecos que electrones –caso de uno de tipo P-. Esto no altera el principio de neutralidad, ya que ahora se han añadido impurezas que son responsables de esa disparidad. Decimos que, en un semiconductor de tipo N los electrones son mayoritarios porque hay más que huecos; al revés para uno de tipo P.

16. Tanto unos como otros transportan carga, pero es mucho mayor el flujo debido a los mayoritarios y, por tanto, la carga neta desplazada se debe esencialmente a ellos.

KHz de frecuencia: habían logrado su propósito, el primer amplificador de estado sólido era una realidad.

Faltaba terminar de elaborar algunas cuestiones teóricas –sin duda importantes– para explicar por completo el funcionamiento del dispositivo; y, sobre todo, faltaba convencer a la cúpula de Bell Labs de que este nuevo componente tenía interés y podía llevarse a fabricación. Pero eso fue después de unas vacaciones de Navidad especialmente gratificantes para los autores de este descubrimiento<sup>17</sup>.

Hoy día sabemos que la puesta en contacto de dos materiales semiconductores, uno de tipo N y el otro de tipo P, da lugar a la formación de un campo eléctrico en la zona de interfaz y, por ende, a la formación de una barrera de potencial eléctrico. Esa barrera se puede hacer más pequeña –e incluso se consigue anular– o más grande si aplicamos una diferencia de potencial entre ambos extremos; dependiendo del signo de esa diferencia de potencial la barrera bajará o subirá. En otras palabras, habrá flujo de carga sólo en una dirección, cuando la barrera haya bajado lo suficiente; en la práctica el resultado es similar al comportamiento observado en los diodos de vacío o en los detectores de galena.

¿Pero cómo era y cómo funcionaba el transistor de Shockley, Bardeen y Brattain? La estructura del nuevo dispositivo es la mostrada en la Figura 3, donde puede apreciarse que consistía en dos finas láminas de oro, separadas entre sí por un par de milímetros, apoyadas firmemente sobre una lámina de semiconductor de tipo N, como se representa en dicha Figura 3. Esto da origen a que se forme una capa superficial tan empobrecida de electrones que se comporta como un semiconductor de tipo P. De esta manera, en torno a cada contacto de oro, se forma una unión P-N. EL terminal eléctrico conectado a la unión de la izquierda recibe el nombre de *Emisor* y el conectado a la unión de la derecha, recibe el de *Colector*.

Si ahora polarizamos la unión de la izquierda con una diferencia de potencial positiva y la de la derecha negativa, aparece un fenómeno curioso. La unión de la izquierda debería dejar pasar la corriente y la de la derecha no. Sin embargo, al estar tan próximas entre sí, hay muchos portadores móviles capaces de pasar de izquierda a derecha, dando lugar a una corriente eléctrica grande en la unión de la derecha. Hay, por tanto, amplificación. El terminal de *Emisor* inyecta portadores a través de esa zona intermedia, que recibe el nombre de *Base*, para que los recoja el terminal de *Colector*.

Lo interesante es que la proximidad entre las dos uniones es primordial para que exista amplificación; en efecto, los electrodos inyectan desde el lado n electrones –mayoritarios– a través de la unión de la izquierda; pero, cuando pasan a la zona central –de tipo p– esos portadores son minoritarios y, por ello, hacen aumentar la corriente. Si esa zona intermedia es ancha, se difunden y desaparecen<sup>18</sup>, pero si es suficientemente estrecha no pueden hacerlo y atraviesan también la barrera de la unión p-n de la derecha.

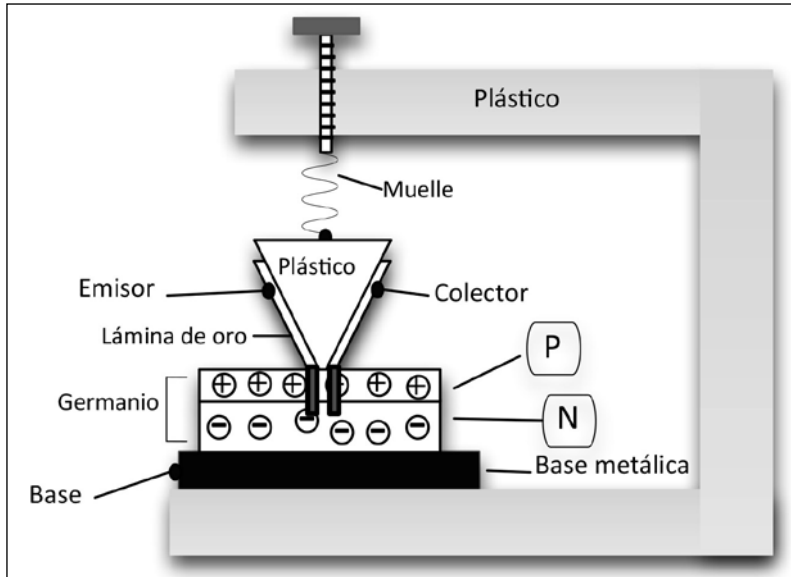
---

17. Es interesante hacer notar aquí una característica que sólo tendría este primer transistor: cualquiera podía fabricarlo en su casa. Las versiones posteriores harían uso de técnicas de miniaturización que quedaban fuera del alcance de cualquier aficionado.

18. Técnicamente se “recombinan” al unirse con un hueco.



**FIGURA 3**  
**ESTRUCTURA FÍSICA DE UN TRANSISTOR DE PUNTA DE CONTACTO QUE REPRESENTA**  
**EL PRIMER TRANSISTOR**



Una vez descrito fenomenológicamente como operaba el recién inventado transistor quedaban dos problemas pendientes para el recién aparecido elemento de circuito<sup>19</sup>. En primer lugar, la urgencia de desarrollar un modelo teórico satisfactorio que explicase lo que estaba ocurriendo en esa estructura semiconductor. En segundo lugar, la necesidad de convencer a *Bell Labs* primero y a la industria electrónica después, de que se había encontrado un sustituto válido del tubo de vacío.

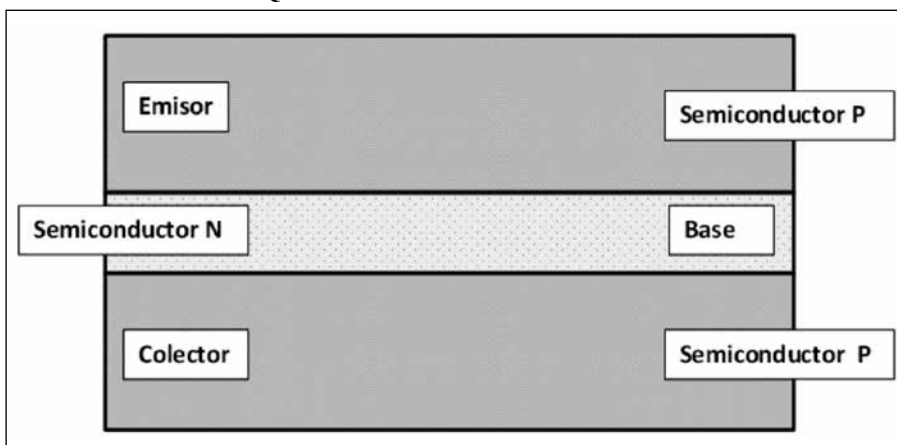
Pero había otro elemento importante que iba a hacer que la evolución hacia los dispositivos semiconductores no se quedara aquí. Shockley, aunque había patrocinado esta invención, no estaba satisfecho con ella. El papel de Brattain y Bardeen había sido capital, mientras que el suyo quedaba desdibujado más allá de ser el jefe del grupo. Pero, más importante aún, el transistor de punta de contacto no satisfacía todas las expectativas que él y Kelly se habían hecho. Ciertamente la factura energética del nuevo dispositivo era mucho mejor que la de una válvula, al no precisar dilapidar potencia calentando el cátodo; pero las dimensiones o la fiabilidad y, sobre todo, la facilidad de producirlo en serie no estaba asegurada.

De ahí que Shockley, en paralelo con su actividad para convencer a los directivos de Bell Labs de la importancia de esa primera válvula de estado sólido, retomara en solitario el trabajo para lograr un dispositivo que realmente significara un cambio de paradigma.

19. Todavía en 1948 se hablaba de la válvula de estado sólido; el nombre “transistor” se acuñó más tarde, como veremos más adelante en este capítulo.

Aprovechando un momento de tranquilidad proporcionado por tener que viajar a un congreso en las Navidades de 1947, Shockley logra cristalizar una idea que le rondaba en la cabeza desde septiembre: hacer un “bocadillo” de germanio en el que el “jamón” sería una lámina de tipo N y las dos rebanadas de “pan”, sendas láminas de semiconductor de tipo P, como se representa en la Figura 4. En analogía con una válvula de vacío, uno de los panes –al que llamó *Emisor*– inyectaría un flujo de huecos en el “jamón”; estos huecos atravesarían esa capa –si era suficientemente delgada– y terminarían por alcanzar la tercera capa –a la que llamó *Colector*–. La tensión eléctrica aplicada a la capa intermedia –que recibió el nombre de *Base*– haría que los huecos inyectados se recombinaran más o menos en dicha capa, controlando así el flujo de carga de *emisor* a *colector*. ¡Y no hacía falta emplear ninguna punta de contacto!

FIGURA 4  
REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL “SÁNDWICH” IDEADO POR SHOCKLEY



Durante el mes de enero siguiente su frustración creció; en efecto, puesto al habla con los expertos en patentes de Bell Labs, Shockley intentó que se tuvieran en cuenta las ideas con las que él consideraba que había influido en el transistor de punta de contacto. Sin embargo, las patentes que existían de Lilienfeld hicieron imposible su participación.

Esto hizo que Shockley se reservara sus ideas sobre el nuevo transistor un poco más. Fue el 18 de febrero de 1948, en un seminario interno, cuando dio a conocer su nuevo concepto. Durante esa reunión, se mantuvo una discusión en la que los asistentes concluyeron que el flujo superficial de carga no era importante para el funcionamiento de un transistor sino la difusión de portadores –huecos o electrones– en la zona profunda del material semiconductor.

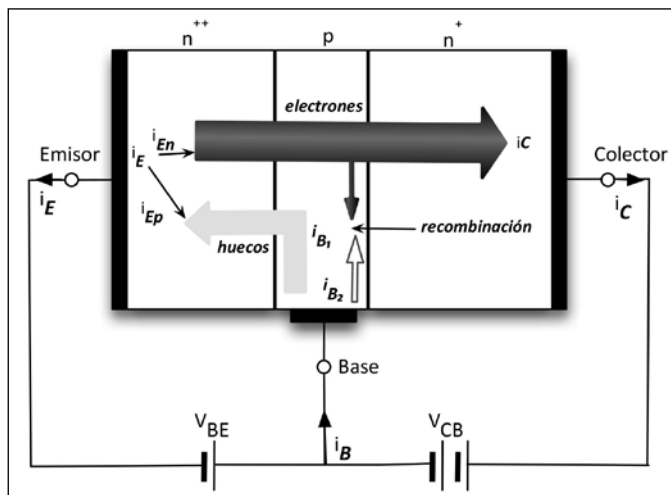
Shockley, viendo que sus colegas –especialmente Bardeen– estaban muy cerca de su nuevo descubrimiento, lo desveló allí mismo para asegurarse la gloria sin que nadie pudiera cuestionar su autoría.

Desde ese momento se estableció una auténtica carrera de ideas y patentes entre Bardeen y Brattain de un lado y Shockley del otro. Esto acabó creando una profunda división dentro del grupo de semiconductores. Los defensores del dispositivo de punta de contacto tenían la ventaja de disponer ya de muestras de su dispositivo funcionando y, por tanto, de poder atraer hacia ellos el potencial de Bell Labs para desplegar la nueva válvula a nivel mundial. Sin embargo, Shockley era una de las dos cabezas del grupo y, por ello, podía asignar los recursos internos en la forma que le pareciera conveniente. Pero veamos los mecanismos que permiten funcionar a uno de esos transistores “bocadillo”. La figura siguiente (Figura 5) muestra el esquema simplificado de uno de estos transistores cuando permite el paso de corriente. Aquí, por comodidad, hemos representado el “bocadillo en una posición distinta a la de la Figura anterior, con lo que el flujo de corriente es ahora horizontal. Como puede verse, se forman dos uniones P–N polarizadas de forma diferente. El flujo de corriente de izquierda a derecha está controlado por la altura de las dos barreras de potencial eléctrico que están asociadas a ambas uniones. Los mecanismos de difusión y arrastre modelan cuantitativamente ese paso de intensidad eléctrica a través de las llamadas ecuaciones de Ebers–Moll, dónde  $\beta_F$  y  $\beta_R$  son, respectivamente, la ganancia en intensidad del colector a la base y la ganancia en intensidad del emisor a la base:

$$i_C = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} - e^{\frac{V_{BC}}{U_T}} \right) - \frac{I_S}{\beta_R} \left( e^{\frac{V_{BC}}{U_T}} - 1 \right)$$

$$i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left( e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} - 1 \right) - \frac{I_S}{\beta_R} \left( e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} - e^{\frac{V_{BC}}{U_T}} \right)$$

FIGURA 5  
ESQUEMA DE TRANSISTOR BIPOLAR DE UNIÓN SEGÚN FUE CONCEBIDO POR SHOCKLEY



El paso de electrones (en la Figura 5 desde el Emisor al Colector) viene controlado por el número de huecos inyectados desde la Base. Esto proporciona un mecanismo de control parecido al de las válvulas de vacío y permite emplear el transistor en aplicaciones similares.

Entretanto nadie podía parar el proceso de industrialización del transistor de punta de contacto. En efecto, en el primer trimestre de 1948, Bill Pfann desarrolló y fabricó una primera versión de la que se produjeron varios miles para uso interno de *Bell Labs*. La idea era no sólo haber sido los inventores del dispositivo sino ganar una amplia ventaja tecnológica en su uso frente a potenciales competidores. Así, se llevó a cabo un gran esfuerzo por adaptar los métodos de diseño de circuitos electrónicos a las características de los transistores. No se trataba meramente de sustituir válvulas de vacío por los nuevos dispositivos sino de desarrollar procedimientos eficientes que permitieran explotar las ventajas de los nuevos componentes de estado sólido.

Uno de los aspectos más interesantes de estos últimos era su capacidad de amplificar tanto un voltaje como una intensidad de corriente, en contraposición a las válvulas, que sólo eran capaces de amplificar voltaje. Visto desde otra perspectiva, el terminal de rejilla de una válvula presenta una impedancia infinita, por lo que la corriente circulante es nula. En cambio, en los nuevos dispositivos, la impedancia que presenta el terminal de base –que juega un papel análogo al de la rejilla– es finita, lo que permite que circule una corriente<sup>20</sup>.

Esto abría un nuevo abanico de posibilidades a los circuitos electrónicos usados en radios, televisores, etc. Se podían concebir nuevas aplicaciones que no serían posibles para una válvula termoiónica.

A finales de mayo, el anuncio publicitario de los nuevos componentes estaba listo; pero faltaba un pequeño detalle: qué nombre darle. Internamente se usaban diversas maneras de llamarlos –triodo de cristal, triodo semiconductor, amplificador de estados superficiales–<sup>21</sup>. Fue John Pierce quien resolvió el problema. Estando un día de mayo del 48 en el despacho de Brattain, éste le habló de las vueltas que estaban dando a un posible nombre. Lo único que él y Bardeen tenían claro era que debería terminar en *or* u *on*<sup>22</sup>, para ser consistente con otros dispositivos que se estaban introduciendo. Basándose en la idea de que los dispositivos amplificadores vienen caracterizados por su transconductancia o su transresistencia, Pierce propuso como nombre *transistor*.

Por esos días, Ralph Bown, el director de investigación en radio, fue encargado de constituir un comité que debía tomar la decisión final respecto al nombre. Después de analizar todos los nombres propuestos y considerar sus (aparentes) fortalezas y debilidades, *transistor* se alzó con el triunfo.

---

20. De hecho, esa corriente es necesaria para que funcione el dispositivo, es la que resulta amplificada.

21. Incluso se propuso el término *iotatrón*, basado en la novena letra del alfabeto griego.

22. Habían aparecido diversos dispositivos (sobre todo, rectificadores) usando cristales semiconductores. Se habían acuñado términos como termistor (un elemento sensible a la temperatura) o varistor (un tipo de rectificador)

Todavía había de retrasarse un mes más el anuncio a la prensa que debía ser el pistoletazo de salida para el uso extensivo del transistor. Por una parte, existían dudas sobre la capacidad de General Electric para suministrar el germanio que pudiera hacer falta, a la vista de las predicciones internas sobre el uso masivo de los nuevos componentes. De otra parte, se decidió informar primero al Departamento de Defensa. El 23 de junio del 48 se hizo una presentación formal ante representantes de los tres ejércitos que incluyó una demostración de un radio receptor realizado completamente con transistores. El propio presidente de Bell Labs, Oliver Buckley actuó de maestro de ceremonias.

Durante los días que siguieron hubo cierto nerviosismo, ya que se sugirió la posibilidad de que se asignara una limitación de alto secreto similar a la que existía sobre la investigación nuclear. Pero finalmente no hubo esa restricción, aunque surgió otro inconveniente. El 25 de junio, Buckley recibió una llamada urgente del almirante Paul Lee, responsable de la investigación naval, reclamando participar en las patentes porque sus hombres habían llegado a resultados similares a los de Bell Labs. Los dos hombres concertaron una reunión urgente en Washington al día siguiente y Buckley ordenó a Bown que asistiera con Shockley y trataran de establecer claramente la situación<sup>23</sup>.

Al día siguiente, Bernard Salisbury –director del grupo que supuestamente había también realizado un amplificador de estado sólido–, arropado por todo un equipo de militares y abogados expertos en patentes, presentó sus logros con todo detalle ante Bown y Shockley. A continuación, este último interrogó inquisitorialmente a Salisbury, inquiriendo todo tipo de detalles técnicos. Para Shockley estuvo muy claro enseguida que se trataba de unos experimentos sin soporte científico; como luego dijo “carentes de una demostración experimental que permitiera demostrar que habían conseguido una amplificación de potencia”. Tras una larga deliberación a la que no pudieron asistir Bown y Shockley, los presentes concluyeron que no existía un conflicto entre las patentes de Bell Labs y el trabajo –incipiente– llevado a cabo por la Armada norteamericana. El camino estaba despejado para el anuncio final.

Este tuvo lugar en una multitudinaria rueda de prensa celebrada el 30 de junio de 1948<sup>24</sup>. Un par de días antes, Shockley llamó al editor de *Physical Review* con quien quedó en que, en el número del 15 de julio, aparecerían tres *papers* relacionados con el transistor, uno del propio Shockley en colaboración con Pearson y los otros dos escritos conjuntamente por Bardeen y Brattain: la brecha entre ellos era manifiesta.

La presentación a los medios fue un gran acontecimiento, en el que brilló especialmente Shockley, mucho más acostumbrado que sus colegas a eventos de esa clase. *Herald Tribune*, *New York Times* o *Time* prestaron una gran cobertura al acto, dedicándole este último su sección de ciencia. Sin embargo, a la vista del impacto real de este

---

23. Se registraron en el hotel Carlton, muy cerca de la Casa Blanca. Esa noche se celebró el mítico combate entre Joe Louis y Jersey J. Walcott y, como anécdota, existe constancia de que Bown y Shockley se relajaron viéndolo por televisión después de cenar.

24. La reunión se celebró en el auditorio del complejo de edificios de *Bell Labs* sito en el 463 de la calle West, en Manhattan, a orillas del Hudson; el primero en tomar la palabra fue Ralph Bown, quien presentó el nuevo dispositivo, indicando que le habían llamado *transistor*.

descubrimiento, ningún medio llegó a vislumbrar los grandes cambios que el transistor traería consigo en las próximas décadas.

El último acto de presentación en sociedad del transistor fue para un público más especializado. El 20 de julio, en Murray Hill, tras una invitación masiva a científicos e ingenieros de todo el país<sup>25</sup>, se llevó a cabo una demostración de su uso. La prensa especializada sí supo entender que se terminaba una época en la Electrónica y comenzaba una nueva era. En particular, la revista *Electronics* dedicó su portada con una foto que se hizo clásica en todas las enciclopedias y wikipedias: Shockley, Bardeen y Brattain, con corbata y en mangas de camisa, observando a su criatura. Los dispositivos semiconductores habían llegado para quedarse y acabarían tomando un papel primordial en nuestra vida diaria.

A partir de ese momento el problema fue atender las demandas que llegaban de todas partes. *Western Electric*, la empresa encargada de manufacturar los nuevos dispositivos, era capaz de producir unos pocos miles al día, un número que se mostró insuficiente enseguida. Además, el comportamiento de los transistores se mostraba un tanto errático, seguramente debido a las impurezas superficiales, difíciles de controlar con la tecnología disponible en aquellos días.

Al objeto de separar la investigación de lo que era desarrollo o producción, Bell Labs decidió crear un grupo independiente que se dedicase al desarrollo de carácter fundamentalista. Se contrató como responsable a Jack Morton, un ingeniero que había desarrollado una válvula en miniatura para microondas que había permitido los enlaces de televisión de costa a costa.

La tardanza por parte de *Bell Labs* en dar a conocer su descubrimiento hizo que, entretanto, dos científicos alemanes, Herbert F. Mataré y Heinrich Welker, que trabajaban para una empresa francesa, solicitaran y consiguieran una patente sobre un dispositivo transductor de estado sólido al que llamaron *transistón*, que llegó a usarse industrialmente.

No vamos a seguir el camino detallado de la competencia entre los dos frentes creados dentro del grupo de Shockley. Baste mencionar que, entre 1948 y 1949, éste refinó su idea del “bocadillo” y terminó demostrando la superioridad de su transistor bipolar<sup>26</sup> de unión frente al transistor bipolar de punta de contacto.

La investigación fuera y dentro de Bell Labs, se centró, como hemos dicho, en encontrar procedimientos para producir masivamente transistores con rendimientos mayores y mejores. De esa manera aparecieron los transistores de unión y aleación (General Electric y RCA, 1951), de barrera superficial (Philco, 1953), de arrastre por campo (inventado por Herbert Kroemer, del Servicio Postal Alemán, 1953), de difusión (Bell

---

25. Uno de los invitados que declinó asistir fue Lee de Forest, el inventor del triodo, a la sazón director de investigación en *American Television Inc.* Con gran visión de futuro, se excusó diciendo que no le agradaba asistir al “velatorio” por su hijo, el *audión*.

26. La denominación “bipolar” hace referencia a que, en los fenómenos de conducción de estos transistores juegan un papel importante tanto electrones como huecos, independientemente de cuales sean mayoritarios o minoritarios.

Labs, 1954) y, sobre todo, los que serían los ganadores de esta carrera: el transistor mesa (Texas Instruments, 1957), el planar (desarrollado por Jean Hoerni de Fairchild, 1959) y el epitaxial (Bell Labs, 1960). En ese mismo intervalo de tiempo se pasó de fabricar miles a fabricar millones de transistores<sup>27</sup>.

Durante esa década, los transistores fueron sustituyendo gradualmente a las válvulas en la mayoría de los productos electrónicos comerciales; al principio coexistiendo, ya que las aplicaciones que requerían cierta potencia o velocidad les estaban vedadas. Pero pronto también en esos campos, sobre todo con la introducción del transistor de barrera superficial, por parte de Philco. En 1955, por ejemplo, se hizo realidad en Reino Unido el primer computador realizado con transistores, el Harwell CADET<sup>28</sup>, empleando dispositivos suministrados casi artesanalmente por STC y Mullard, dos empresas británicas.

No obstante, la revolución en esta década en el ámbito de los computadores estuvo centrada en dotarlos de elementos que facilitaban enormemente su programabilidad permitiendo que fuera mucho más amplio su campo de aplicaciones. Conceptos como sistema operativo o lenguaje de alto nivel nacieron en esos años y posibilitan una mayor penetración del ordenador en la sociedad. Por supuesto, su alto coste y su –todavía– difícil uso lo mantenían alejado del gran público.

Sin embargo, una buena parte de la responsabilidad del enorme aumento de la presencia de los transistores fueron algunos productos específicos que, con válvulas, no hubieran podido desarrollarse. Fundamentalmente nos referimos a la radio portátil y a la radio de automóvil.

La llamada radio a transistores<sup>29</sup> aparece en 1953, en la feria de Düsseldorf, presentada por Intermetall, si bien Texas Instruments había demostrado esa idea en un prototipo. Sin embargo, el primer producto comercial fue la TR-1 construida por la Regency Division de I.D.E.A. Estas radios sólo podían captar emisoras de AM (es decir, que usaran modulación en amplitud), dada la limitación en frecuencia de los transistores empleados<sup>30</sup>; por esa razón, el uso de los nuevos dispositivos ni siquiera se planteó en el ámbito de la televisión del momento.

En Japón, una pequeña empresa local tuvo la idea de involucrarse en la fabricación de estas mini-radios y, para ello, consiguió una licencia de producción de transistores. Esta empresa cambió su nombre original por el de Sony<sup>31</sup> y logró un importante éxito mundial con su TR-63, el primer receptor realmente portátil alimentado con una batería de 9 voltios, que llegó al mercado en 1957. Su impacto social fue tan grande que, en muchos países se simplificó el nombre de “radio a transistores” por el de transistor, de ahí cierta confusión que aún perdura.

---

27. En 1954 se manufacturaron más de un millón de transistores, volumen que pasó a ser de 30 millones en 1957.

28. Se usaron transistores de punta de contacto, demasiado influenciados por el ruido eléctrico.

29. Estas radios se conocieron popularmente en España como *transistores*.

30. La frecuencia de uso de este tipo de transistores estaba limitada a unos pocos MHz, debido a la dificultad de hacer la base más estrecha.

31. El nombre original era Tokyo Tsushin Kogyo, obviamente más difícil de popularizar que Sony.

El otro producto de gran consumo que nació con los transistores y fue otro de los producidos a gran escala fue la radio del automóvil. Philco, en colaboración con Chrysler, lanzó al mercado el primer modelo conocido totalmente realizado con transistores, el Mopar model 914HR, disponible para los modelos Imperial de Chrysler a partir de 1956. Empleaba 12 transistores, disponía de un altavoz dinámico y se alimentaba de la propia batería del coche, disponiendo de hasta seis bandas de AM.

Durante estos primeros años, el material semiconductor preferido fue el germanio, debido a sus características de purificación. Sin embargo, los trabajos realizados independientemente por Morris Tanenbaum en Bell Labs y por Gordon Teal en la naciente Texas Instruments permitieron disponer de un transistor de silicio que se demostró más adecuado para su uso y producción. Además, el silicio es mucho más abundante en la naturaleza<sup>32</sup>, lo que implica un precio menor. Eso permitió que el silicio le fuera ganando cuota de mercado al germanio y abrió la puerta al que sería el gran avance de la década de los cincuenta: el circuito integrado.

Aunque *Bell Labs* fue pionero en el empleo del silicio, su atención se desvió pronto a su uso en las baterías solares basadas en una unión P-N de silicio muy uniforme. Al incidir fotones sobre su superficie pueden generar pares electrón-hueco que son atraídos hacia el polo positivo o el negativo<sup>33</sup> generando una corriente eléctrica y una diferencia de potencial de casi medio voltio. En abril de 1954, Daryl Chapin, Calvin S. Fuller and Gerald Pearson demostraron públicamente el descubrimiento de una célula fotovoltaica. Habían nacido las células y paneles solares. Curiosamente, el interés que despertó este descubrimiento ocupó una gran parte del esfuerzo científico y tecnológico en *Bell Labs* en la segunda mitad de la década de los cincuenta, lo que probablemente fue la causa de su bajo protagonismo en el desarrollo del concepto de chip.

En este mismo período, Rubin Braunstein de Radio Corporation of America (RCA) reportó por primera vez la existencia de emisión infrarroja en arseniuro de galio y en otros semiconductores compuestos, descubriendo así el diodo emisor de luz (Light Emitting Diode ó LED)<sup>34</sup> y abriendo la puerta a un nuevo tipo de comunicaciones y, sobre todo, al láser<sup>35</sup>.

Pero debemos regresar a Shockley para conocer algunos detalles de esos años que tendrían un lugar importante en la historia de la Electrónica. En 1953, el co-inventor del transistor empieza a sentirse a disgusto en Bell Labs. Se considera mal tratado en comparación con otros colegas y decide buscar una salida. Tras diversos intentos, funda en 1956 una firma comercial que deberá dedicarse a la investigación en transistores, el

---

32. La arena de playa es, por ejemplo, una fuente de silicio en forma de sílice.

33. Los electrones son atraídos por el polo positivo y los huecos por el negativo.

34. En realidad el LED fue inventado por el investigador soviético Oleg Losev en 1927. La historia de este científico parece de ficción; terminó sus estudios de secundaria en 1920 y, debido a la revolución bolchevique, no recibió una educación científica formal, pese a lo cual publicó 43 trabajos en renombradas revistas alemanas, rusas y británicas. Losev murió de hambre en 1942, durante el cerco de Leningrado, a los 39 años.

35. El primer láser basado en un LED fue debido a Robert Hall y Nick Holonyak, de los laboratorios de General Electric, en 1962.



*Shockley Semiconductor Laboratory*; una empresa que nunca llegará a ser rentable pero que dio lugar a dos hechos fundamentales para la Electrónica moderna. Por una parte, decidió ubicarla en los alrededores de San Francisco, inicialmente en San Antonio y posteriormente, en el incipiente Stanford Industrial Park de la universidad de Stanford. El otro hecho relevante fue el reclutamiento de un grupo de jóvenes profesionales, físicos, químicos e ingenieros, todos ellos muy brillantes, que acabarían teniendo un papel muy relevante en el desarrollo del circuito integrado.

La actividad del laboratorio no pudo comenzar con mejor pie, toda vez que en noviembre de 1956 le comunicaron que había sido galardonado con el Nobel de Física junto a Bardeen y Brattain. Pero eso no se tradujo en un éxito de la naciente compañía; al contrario, su ambición personal y su incapacidad para manejar todo el talento que acumulaban sus jóvenes colaboradores terminó conduciendo a ocho de éstos –los llamados “ocho traidores”, en palabras de Shockley– a fundar en 1957 una nueva compañía a pocas calles del laboratorio. Había nacido *Fairchild Semiconductors*<sup>36</sup>, a la que pronto se unirían otras firmas dando lugar a lo que más tarde se conocería como Valle del Silicio<sup>37</sup>.

Pero lo más importante de esta deserción es que, entre los ocho que abandonaron a Shockley, se encontraban dos personas que habían de conseguir un lugar prominente en la historia de la Electrónica: Gordon Moore y Robert Noyce. Del primero hablaremos en un contexto algo diferente, al segundo tenemos que referirnos en este momento.

En efecto, desde 1952 flotaba en el aire la idea de hacer mucho más compactos los circuitos con transistores. Se había conseguido una importante miniaturización de los componentes activos, hasta entonces mucho más voluminosos que los pasivos; pero el advenimiento del transistor había invertido las tornas: ahora las resistencias, los condensadores o las bobinas eran mucho mayores que los propios transistores. Además, se necesitaban tantos cables para conectar los circuitos según crecían en complejidad, que su montaje era costoso, lento y, muchas veces, erróneo. Había, por tanto, dos problemas encima de la mesa: reducir el tamaño de los componentes pasivos y reducir y organizar el interconexiónado.

Como hemos mencionado, ya en 1952, un británico, Geoffrey Dummer, había introducido la idea de usar un “bloque semiconductor” para realizar circuitos complejos. En Estados Unidos, el departamento de Defensa sufragó en esos años un par de proyectos con esa misma finalidad, aunque sin éxito.

---

36. Fairchild Semiconductors nació como una start-up de Fairchild Cameras and Instruments, que proporcionó a los “ocho traidores” la financiación que necesitaban para independizarse.

37. El término “Silicon Valley” se usa para denominar el valle de Santa Clara y zonas aledañas, ubicado al sur de la bahía de San Francisco, California. Allí se concentraron una gran cantidad de pequeñas empresas tecnológicas, muchas de las cuales hoy son multinacionales muy conocidas. Esta concentración se debe a una idea visionaria de Frederick Terman, decano de la Escuela de Ingeniería de Stanford entre 1951 y 1955, que comenzó a dar facilidades para instalar este tipo de empresas en terrenos de la universidad. Años más tarde, esa área se convertiría en la cuna de las nuevas tecnologías: Electrónica, Informática y Comunicaciones.

Serían, sin embargo, dos personas trabajando individualmente, quienes llegaron por separado a una solución del problema. Una de ellas fue Robert Noyce, a quien acabamos de mencionar, y la otra fue Jack Kilby. Éste acababa de incorporarse a Texas Instruments en el verano de 1958; la empresa tenía la política de que todos sus empleados tomaran vacaciones al mismo tiempo, por lo que Kilby estuvo durante un par de semanas sin ninguna asignación de trabajo. En ese período, Kilby que era un defensor del papel del silicio como semiconductor básico, concibió la idea de fabricar los componentes pasivos en un bloque monolítico de silicio. Al regresar su jefe directo, le propuso su idea, que fue aceptada. Sin embargo, sus primeras pruebas tuvieron que hacerse con un cristal de germanio, debido a carencias tecnológicas de la compañía. Pero en pocas semanas, Kilby tuvo listo un oscilador en el que, además de un transistor, se incluía una resistencia hecha con germanio y un condensador basado en un diodo de unión inversamente polarizado. Se llevaron a cabo otras pruebas, usando ya silicio, todas con un éxito razonable.

No obstante, nadie pensó en patentes hasta que, a finales de enero de 1959, se corrió el rumor de que RCA, entonces un gigante del mercado, estaba preparando una que podía versar sobre el mismo tema. Inmediatamente se puso en marcha la maquinaria legal de Texas Instruments, anunciándose públicamente el descubrimiento en marzo de ese año.

Pero en realidad quien estaba en trance de patentar algo muy relacionado era un investigador de Fairchild Semiconductors: Robert Noyce. Si Kilby había resuelto el problema de los componentes pasivos, Noyce estaba abordando el de las conexiones. En su empresa acababan de perfeccionar el proceso planar para transistores de silicio usando óxido de silicio como aislante. Combinando eso con técnicas fotolitográficas, estaban en condiciones de realizar dispositivos de gran calidad. Y a Noyce se le ocurrió, en enero de 1959, que los cables de conexión entre transistores podían hacerse depositando una fina capa de aluminio sobre la superficie del silicio; el óxido actuaría de aislante y las conexiones serían mucho más finas que un cable ordinario y podían ir soldadas directamente al silicio. El conexionado dejaba de ser un cuello de botella. La Figura 6 muestra una fotografía de cada uno de esos dos chips pioneros.

Curiosamente, la oficina norteamericana de patentes concedió primero a Noyce la suya –en 1961– y posteriormente a Kilby, pese a que éste la había solicitado primero<sup>38</sup>. La razón hay que buscarla en la mayor concreción de las ideas de Noyce. Pero, en cualquier caso, hay que entender ambas patentes como complementarias. Las dos abrieron paso conjuntamente al microchip, al circuito integrado o circuito monolítico<sup>39</sup>.

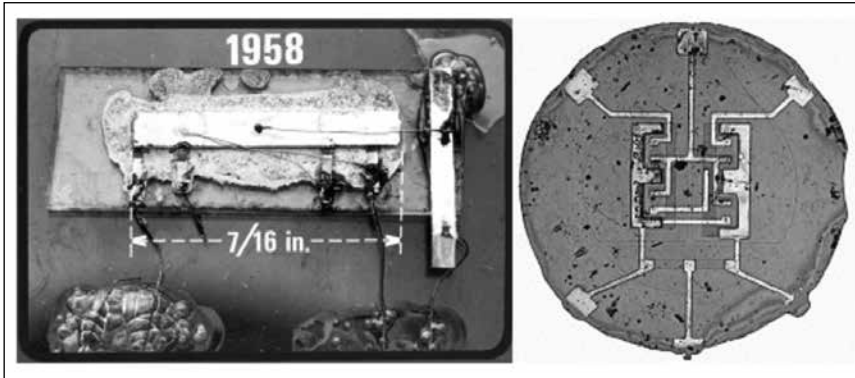
La idea parece hoy muy sencilla: hagámoslo todo usando un semiconductor y depositando materiales conductores sobre su superficie. Pero quién podía imaginar en 1959 que este nuevo concepto, al evolucionar, iba a cambiar incluso las costumbres sociales

---

38. No sería hasta 1963 que Kilby no recibiría la aprobación de las patentes que había solicitado.

39. Hay una cierta injusticia histórica en la concesión del premio Nobel de Física de 2000 sólo a Kilby; la razón es muy simple, Noyce había muerto ya por lo que, según las bases del premio no podía ser galardonado también.

**FIGURA 6**  
**A LA IZQUIERDA, CIRCUITO INTEGRADO PATENTADO POR KILBY. A LA DERECHA,**  
**MICROFOTOGRAFÍA DEL QUE PATENTÓ NOYCE**



¿Había alguien capaz de predecir el papel que, por dar una muestra de lo que decimos, los móviles, las tabletas o internet podrían llegar a tener hoy?

Por supuesto, era imposible en 1960 predecir el impacto que iba a tener el paso de los fenómenos de conducción en el vacío (válvulas) a los de conducción en semiconductores (transistores). En ese momento, comenzaba la carrera espacial, por lo que la industria del transistor bipolar iba a sufrir un enorme empujón, añadiendo nuevos mercados a la electrónica de consumo, consolidada gracias a la miniaturización de los receptores de radio, a los audífonos y a algunas otras aplicaciones de gran volumen, entre las que cabe destacar el sector de los electrodomésticos<sup>40</sup>.

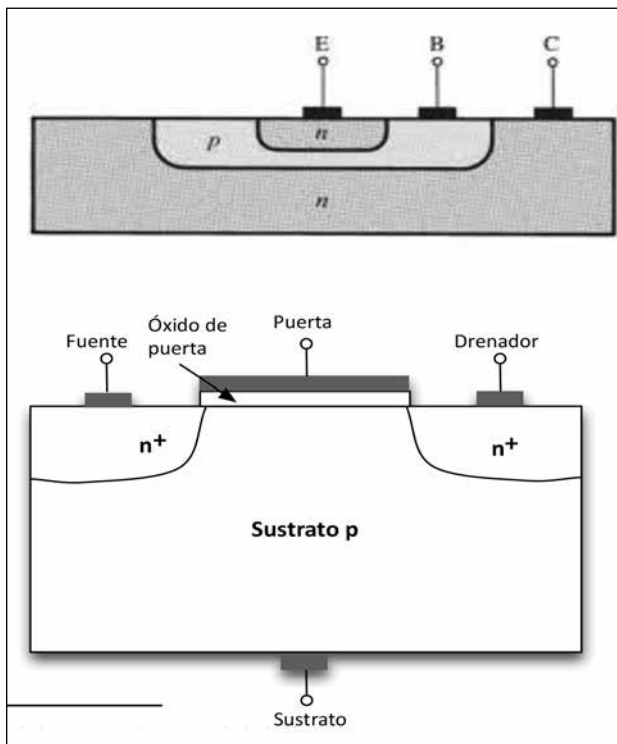
Sin embargo, la progresión no se detuvo; al contrario, el silicio comenzó a ofrecer posibilidades interesantes difícilmente alcanzables con el germanio. De entre todas ellas, la más importante se debió nuevamente a *Bell Labs*. El desarrollo de la tecnología de silicio permitió hacer viable el tipo de transistor que había querido desarrollar inicialmente Shockley y que había terminado por abandonar. Se trataba de un transistor de efecto campo similar al propuesto por Lilinfield. El hecho de poder utilizar óxido de silicio como dieléctrico elimina buena parte de los estados superficiales de carga que impedían que la idea de Shockley funcionara. De esa forma, Dawon Kahng y Martin M. (John) Atalla construyeron el primer transistor unipolar<sup>41</sup>, que comenzó a conocerse como MOSFET<sup>42</sup> o simplemente MOS (de las siglas de Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor,

40. Se había iniciado la búsqueda de portabilidad en los sistemas electrónicos, una tendencia que domina todavía actualmente las aplicaciones electrónicas.

41. Unipolar porque la carga que se mueve corresponde a los portadores mayoritarios, incluyendo los inducidos en el canal de conducción.

42. De las siglas en inglés de Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor. ya que el terminal de control estaba originariamente implementado por un metal). Posteriormente, se sustituyó por silicio policristalino (polisilicio) y el dieléctrico por óxido de silicio.

**FIGURA 7**  
**ARRIBA: ESQUEMA DE TRANSISTOR BIPOLAR (CORTE VERTICAL).**  
**ABAJO: TRANSISTOR MOS O UNIPOLAR (CORTE VERTICAL)**



La Figura (Figura 7) precedente nos muestra una vista comparativa de las dos clases de transistores: bipolar (arriba) y unipolar (abajo). Sin un campo eléctrico aplicado al terminal de puerta, no existe canal conductor entre las islas de Fuente y Drenador. Al aplicarlo, se induce (por un efecto similar al de un condensador) un canal conductor. Así, ese campo hace de elemento de control similar al que hemos descrito ya para válvulas y transistores bipolares. Hay que señalar que, al contrario que en los transistores bipolares, en los MOS el transporte de corriente tiene lugar a través de los portadores mayoritarios, ya que el canal que se forma es de signo contrario al sustrato (en la figura, el sustrato es de tipo p, pero el canal inducido es de tipo n). Las ecuaciones que rigen el comportamiento de este nuevo transistor tienen una estructura muy diferente a las del transistor bipolar. El flujo de corriente de drenador a fuente (a través del canal) obedece a ecuaciones que dependen de las tensiones aplicadas entre Drenador (D) y Fuente (S),  $V_{DS}$ , y entre Puerta (G, de Gate) y Fuente, ( $V_{GS}$ , que es la tensión de control aplicada)

$$\begin{aligned}
 I_{D(SAT)} &= I_D(V_{DS}=V_{DSAT}) \\
 &= \mu_n C_{ox} (W/L) [(V_{GS}-V_T) V_{DSAT} - V_{DSAT}^2/2] \\
 &= v_{d(SAT)} C_{ox} W (V_{GS}-V_T - C_{SAT}/2)
 \end{aligned}$$

Con los estados superficiales bajo control, Kahn y Atalla fabricaron en 1960 el primer transistor MOS. Pronto la industria comprendió que este nuevo dispositivo permitiría reducir las dimensiones aún más. En efecto, los transistores bipolares, aunque sean fabricados sobre un mismo cristal de silicio, requieren ser aislados eléctricamente entre sí en todas las dimensiones espaciales, lo que significa espacio perdido. En cambio, los transistores MOS no precisan otro aislamiento que el lateral, lo que hace más sencillo construirlos y permite mayores densidades de empaquetamiento.

Estas características fueron pronto extendidas con la introducción del concepto de tecnología MOS de simetría complementaria (CMOS), en la que dos transistores, uno de canal N y otro de canal P<sup>43</sup>, son interconectados entre sí de manera que cada uno hace de carga del otro y comparten un sustrato común, lo que los hace muy compactos. En 1963, C. T. Sah y Frank Wanlass, de los laboratorios de I+D de Fairchild, presentaron esta estructura que permitía que la corriente circulante estática fuera prácticamente nula, con la consiguiente ventaja de reducir la potencia disipada y, por tanto, realizar chips mucho más complejos.

La combinación de transistores MOS y parejas CMOS, así como las facilidades ofrecidas por la fotolitografía para “imprimir” patrones geométricos muy pequeños, comenzó a permitir el crecimiento en complejidad de los circuitos integrados. Así, frente a los pocos transistores que conformaban un circuito monolítico en la primera mitad de la década de los sesenta, comienzan a aparecer sistemas que alcanzan las decenas y centenares de dispositivos en la segunda mitad. El procedimiento completo de fabricación de dichos circuitos integrados se basaba –y todavía hoy se basa– en la fabricación simultánea de muchos circuitos iguales sobre una misma “oblea” de material semiconductor<sup>44</sup> como la que se muestra en la Figura 11. Básicamente, se realizaba (y se realiza todavía) una impresión múltiple de patrones sobre el silicio y una deposición selectiva de materiales, en un proceso formado por una sucesión de pasos repetidos<sup>45</sup>. Los precios comenzaron a ser bajos<sup>46</sup> y la aceptación en diferentes mercados fue creciendo más y más.

En este contexto, en la industria de computadores comenzaron a larvarse nuevos conceptos de implementación basados en componentes semiconductores. Por supuesto, la progresiva sustitución de las válvulas por transistores de silicio era ya un hecho hacia 1965. Sin embargo, la memoria, un componente esencial, seguía siendo de tipo magnético. Esto significaba un volumen grande pese a la reducción conseguida desde que se inventó esta tecnología en 1947. Esencialmente, las memorias de esa época estaban

---

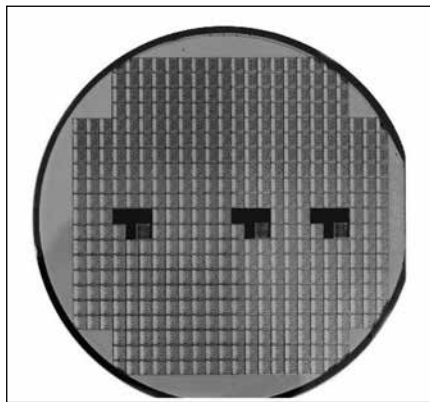
43. Por conveniencia, esta terminología se explicará más adelante.

44. Esta oblea es sometida a procedimientos de refinado, limpieza y pulido antes de ser usada para “grabar” sobre ella múltiples copias de un circuito.

45. En esencia, cada paso es similar: el semiconductor se recubre de una sustancia fotosensible y luego se expone selectivamente a la luz usando una máscara que contiene dibujos geométricos. A continuación, se procede al “revelado” para fijar los huecos que quedan y se alteran las propiedades de las zonas expuestas por medio de algún proceso físico-químico para luego disolver lo que queda de la capa fotosensible y continuar con otros pasos similares.

46. Los primeros transistores superaban los 100 dólares por unidad; en 1965 su precio había caído por debajo de un dólar.

**FIGURA 8**  
**OBLEA USADA EN LA FABRICACIÓN DE CHIPS. PUEDEN APRECIARSE LAS DIFERENTES COPIAS DE UN MISMO CIRCUITO**



formadas por una matriz bidimensional de núcleos toroidales magnéticos con unas dimensiones milimétricas, que se atravesaban por tres cables metálicos para garantizar su operación. Esto significaba un ensamblaje costoso y de difícil automatización, aparte de la energía necesaria para excitar los núcleos y de la dificultad de conseguir una mayor reducción de tamaño<sup>47</sup>.

En 1965 aparece la primera memoria semiconductor; realizada con transistores bipolares, se trataba de una ROM de 256 bits, producida por Sylvania. Ese mismo año apareció la primera memoria con transistores MOS, una ROM de 1024 bits –más lenta de operación, por supuesto– fabricada por General Microelectronics.

También ese año la revista *Electronics*, que celebraba su trigésimo aniversario, invitó a Gordon Moore, de quien ya hemos hablado más arriba, en ese momento director de investigación de Fairchild, a predecir cómo podían evolucionar los circuitos integrados en la siguiente década. Moore, basado en la evolución habida desde su introducción, predijo que la complejidad de los chips crecería de tal manera que se duplicaría cada año. Se trataba de una predicción muy aventurada, toda vez que la estaba haciendo basado en menos de cinco años de existencia del circuito integrado; sin embargo, con una leve corrección realizada en 1975, esta predicción se ha continuado cumpliendo desde entonces según lo que Carver Mead, un profesor de Caltech, dio en llamar **Ley de Moore**, nombre con el que se la conoce desde 1975<sup>48</sup>. En 1968, Moore y Noyce –uno de los dos inventores del circuito integrado– abandonaron *Fairchild* y fundaron *NM Electronics*,

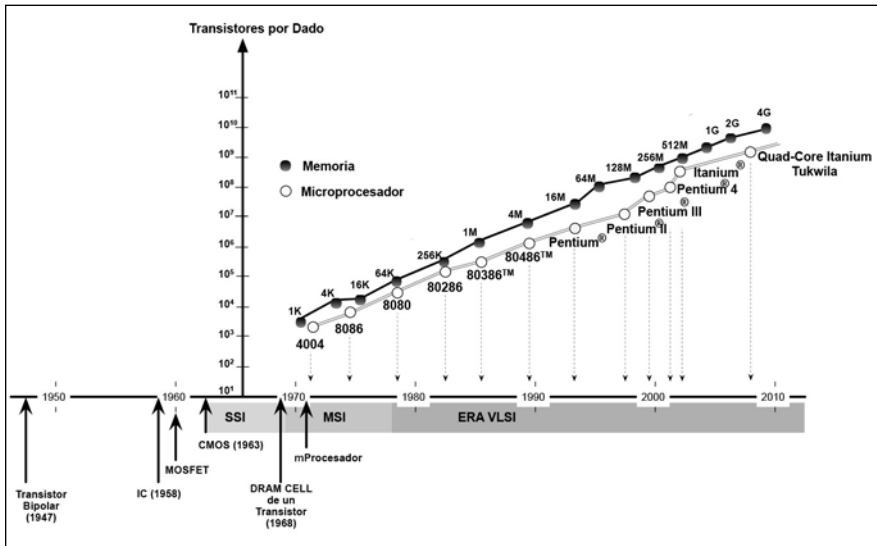
---

47. La dificultad residía en que dentro de cada toroide debían pasar tres cables al menos, lo que obligaba a unas dimensiones mínimas limitadas por el diámetro de los cables; este diámetro, a su vez, estaba restringido por la rigidez necesaria para garantizar que no se rompieran durante el proceso de ensamblado.

48. Esta ley prevé en realidad un crecimiento en complejidad que significa una duplicación del número de transistores por chip en un período que va de 18 a 24 meses, según el momento. Es importante hacer notar que esta ley sólo es válida para chips totalmente digitales, incluyan o no memorias.

que pasó a llamarse *INTEL* al año siguiente. Sus primeros productos fueron memorias<sup>49</sup> de alta velocidad –para la época–<sup>50</sup>.

**FIGURA 9**  
**REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA LEY DE MOORE. SE HACE ALUSIÓN A LOS TÉRMINOS SSI (SMALL SCALE INTEGRATION), MSI (MEDIUM SCALE INTEGRATION) Y VLSI (VERY LARGE SCALE INTEGRATION), QUE CORRESPONDEN A UN GRADO CRECIENTE DE INTEGRACIÓN DE LAS DISTINTAS GENERACIONES DE CHIPS**



Pero sería RCA la empresa que popularizaría su uso, primero en aplicaciones espaciales y más tarde en productos comerciales que no precisaran una velocidad de operación muy alta. En 1968 esta compañía introdujo la primera memoria semiconductora de tipo RAM estático y los primeros circuitos de su popular familia de chips digitales CD4000.

Otro logro importante fue la introducción de las memorias dinámicas o memorias DRAM, una técnica que empezó a permitir memorias semiconductoras de un tamaño significativo. La idea se debe a Robert Dennard, quien en 1966 desarrolló para IBM la primera memoria de este tipo. Se trataba de una matriz de transistores MOS actuando como condensadores, cada uno de ellos direccionable eléctricamente; cada condensador

49. Resulta muy curioso que, estando todavía en Fairchild, en 1964, Moore había tachado la idea de construir memorias semiconductoras –presentada por Bob Norman– como “...económicamente tan ridícula que no vale la pena gastar dinero en patentarla”.

50. La primera memoria que INTEL fabricó fue la 1101 Ad, una memoria de 256 bits con un tiempo de acceso de 1,5 ms. La celda elemental de memoria se ha empleado como base de otras muchas meorias comerciales, convirtiéndose en el objeto fabricado por el hombre del que más copias existen, ¡se calcula que en el orden de miles de millones!

podía almacenar un bit de información, esto es, un 0 ó un 1 lógico y para no perder la información grabada, era necesario un proceso periódico para “refrescar” los valores almacenados. Esto lentificaba la operación de la memoria, pero, dado el pequeño tamaño de cada célula, se podían conseguir bloques de memoria relativamente grandes<sup>51</sup>.

Los ordenadores se habían beneficiado primero de la introducción de los transistores bipolares para, a partir de comienzos de la década del sesenta, comenzar a usar circuitos integrados. La disponibilidad de memorias integradas era todavía insuficiente debido a su pequeño tamaño y a sus velocidades de operación, que las hacía idóneas sólo para tareas muy específicas.

Sin embargo, flotaba en el ambiente la posibilidad de realizar un ordenador completamente integrado<sup>52</sup>. Toshiba realizó un primer intento en 1966 con su calculador Toscal. Sin embargo, la memoria estaba formada por componentes discretos. Calculadoras y más tarde computadores integrados pudieron, no obstante, existir por el trabajo pionero de INTEL que, en 1971 puso en el mercado su familia 4004, formada por una CPU, memorias y un manejador de periféricos cada uno realizado en forma de circuito integrado<sup>53</sup>. Esta familia trabajaba con palabras de 4 bits<sup>54</sup>; al año siguiente, INTEL lanzó el 8008, que duplicaba el tamaño de palabra<sup>55</sup>.

Sin duda se trataba de otro hito importante en la evolución de la Electrónica; un hito tecnológico que fue reconocido muy pronto como tal y, a largo plazo, una revolución social. La clave del éxito de INTEL fue la contratación de Federico Faggin, anteriormente en Fairchild, a quien se le encomendó implementar una arquitectura de procesador imaginada por Marcian (Ted) Hoff, Stanley Mazor y Masatoshi Shima, este último como representante de la empresa Busicom, un fabricante de calculadoras, cliente de INTEL. Faggin ideó un nuevo procedimiento para realizar memorias RAM usando polisilicio en lugar de aluminio para las puertas de los transistores MOS.

Otras empresas se lanzaron enseguida por la senda abierta por INTEL, que puso en el mercado en 1974 dos versiones mejoradas: los procesadores 4040 y 8080, también

---

51. Entre 1969 y 1973, se pasó desde 512 a 4.096 bits, con productos liderados por INTEL y MOS-TEK. Precisamente la rivalidad en la producción de memorias DRAM dio lugar, a mediados de los setenta, al primer gran enfrentamiento comercial EEUU-Japón en el ámbito de la industria electrónica.

52. Conceptualmente se trataba de diseñar un chip para cada uno de los componentes que, en ese momento, se consideraban esenciales en un computador: CPU, memoria ROM, memoria RAM y subsistema de entrada-salida.

53. En realidad, quien primero usó el término microprocesador fue la empresa Viatron Computer Systems para su System 21, que era un computador de tamaño reducido, no un verdadero microprocesador como lo entendemos hoy en día.

54. EL INTEL 4004 era la CPU de una familia de 4 chips que, además de la CPU (4004), comprendía una memoria RAM (4002), otra ROM (4001) y un controlador sencillo de periféricos (4003), cada uno de ellos como un chip diferente. El chip de la CPU contenía unos 2300 transistores, su velocidad máxima de reloj era de 740 KHz, contenía 16 registros de 4 bits cada uno y su conjunto de instrucciones era de 46 instrucciones.

55. Entre 1969 y 1971 hubo otras compañías que abordaron la realización de una CPU (de las siglas en inglés de Unidad Central de Procesamiento) integrada. Pero INTEL, para atender un pedido de la japonesa Busicom, fue la única que terminó por producir una CPU en un único chip.



debidos a Faggin. Pero éste abandonó la compañía y fundó Zilog, cuyo microprocesador Z80 hizo desde 1976 la competencia al 8080. En 1975 se puso en el mercado otro competidor importante, el 6800 de Motorola.

En 1974, Texas Instruments comenzó a comercializar el primer microcontrolador, el TMS 1000, diseñado por un equipo dirigido por Gary Boone y Michael Cochran. Aparte de la CPU, el TMS 1000 incluía memoria RAM y ROM y un generador de reloj en un único chip.

A partir de 1975 es difícil hacer un resumen de la rápida evolución de estos microsistemas. Se emplean, por supuesto, para implementar calculadoras y microordenadores<sup>56</sup>, pero también para controlar sistemas de diferente naturaleza y aplicaciones. Un ejemplo de estos últimos es el COSMAC 1802 de RCA, introducido en 1975 para controlar el motor de los modelos de Chrysler, del que se venderían millones de copias.

De hecho, comienza a considerarse tanto en la industria como en la academia que el futuro de la Electrónica va a ser exclusivamente digital, idea un tanto superficial que olvida el carácter analógico de la propia naturaleza, incluido el principal usuario de los sistemas electrónicos, el hombre. No obstante, algunas universidades e industrias no dejan que se apague la llama en el mundo analógico y, también allí, hay que mencionar innovaciones interesantes.

A comienzos de 1960, tanto NASA como el Departamento de Defensa de EEUU, estaban interesados en llevar a cabo en el caso analógico un trabajo paralelo al que se estaba comenzando a hacer en digital. Esto se demostró enseguida muy complejo; en efecto, en digital se habían podido utilizar conceptos vinculados a la lógica booleana para estandarizar los circuitos producidos. Habían nacido así conceptos muy modulares como puertas lógicas, biestables o registros<sup>57</sup>, a partir de los cuales podían construirse cualquier sistema complejo.

En el ámbito analógico no existía nada parecido, por lo que muchas empresas desistieron de entrar en un terreno farragoso del que no se sabían los beneficios, en favor del campo digital, en el que resultaba fácil hacer dinero. No obstante, alguna empresa nacida al efecto, como Autonetics, o alguna división de una empresa de mayor tamaño, caso de Westinghouse o Texas Instruments, no cejaron en su empeño. El propio Jack Kilby, todavía en TI, diseñó el que sería primer amplificador diferencial en un chip, utilizado por Autonetics en su sistema de control de vuelo, empleado en los cohetes Minuteman. Este amplificador empleaba transistores bipolares NPN.

---

56. Desde 1970 existieron empresas que comenzaron a comercializar microordenadores, entiendo como tal a ordenadores pequeños realizados con chips de las diferentes familias que iban apareciendo, sobre todo 8008 y 8080. No eran sistemas de propósito general y su programación resultaba muy compleja. El Altair 8800 de MITS, introducido en 1975, fue el primero que incluyó una EPROM con el software de sistema, lo que facilitó enormemente su uso y programación.

57. Una puerta lógica es la implementación electrónica de un operador lógico (Y, O, negación); un biestable es una célula elemental de memoria; un registro es un conjunto de biestables que pueden almacenar más de un bit (normalmente 4, 8 ó 16) y pueden realizar alguna operación con los datos almacenados como, por ejemplo, desplazarlos cíclicamente.

Uno de los problemas más importantes de los transistores bipolares en estas estructuras, era debido a su comportamiento térmico. Westinghouse se hizo con los servicios de Hung Chang Lin, previamente en RCA, para encontrar una solución adecuada. Como resultado, Lin aportó dos importantes contribuciones: a) la idea de que, en las estructuras integradas, usar transistores era mejor que usar diodos para compensar los cambios de temperatura, y b) el uso de transistores laterales P-N-P para conseguir mejores ganancias combinándolos con los N-P-N. Esto permitió una mejora significativa en los amplificadores diferenciales integrados.

Sin embargo, en 1963 nadie parecía creer en que los circuitos analógicos podrían ser una fuente de negocio fiable. El coste de fabricación por pieza era muy alto, sobre todo porque no podían hacerse tiradas masivamente grandes como las de los chips digitales, debido a la especificidad de cada bloque analógico. Por otra parte, los circuitos analógicos eran menos tolerantes a las limitaciones propias de los chips monolíticos y más sensibles a la temperatura.

Westinghouse realizó diversos intentos para dotar a sus bloques analógicos de cierta programabilidad, pero con unos resultados muy pobres. Por suerte, en 1963 Fairchild contrata a un auténtico genio en el campo del diseño de circuitos. Se trata de Robert Widlar, un joven que procedía de las Fuerzas Aéreas y había trabajado en el diseño de algunos equipos para NASA. Su llegada significará un revulsivo para la empresa y, sobre todo, para el futuro de la circuitería analógica.

Widlar formó un pequeño grupo de entusiastas que pronto establecieron una metodología para el diseño de amplificadores. Determinaron que sólo podían realizarse –con la tecnología de la época– resistencias y condensadores de pequeño valor debido a la superficie que estos componentes ocupaban en el chip, mucho mayor que la de los propios transistores. Asimismo, determinaron los principales componentes parásitos que son inherentes al proceso de integración y fueron encontrando estrategias para neutralizarlos o para emplearlos en el propio proceso de diseño.

De esta forma, en octubre de 1964, pusieron en el mercado el  $\mu$ A702, el primer amplificador operacional integrado<sup>58</sup>. Este amplificador contenía sólo 9 transistores NPN de silicio y empleaba resistencias de difusión. Sin embargo, su ganancia en lazo abierto no era demasiado alta, lo que limitaba seriamente sus aplicaciones. Afortunadamente, Widlar y su grupo –en el que hay que destacar a Dave Talbert– pudieron introducir mejoras significativas y, un año más tarde, presentaban el que sería el primer circuito analógico de venta masiva: el mA709. Este amplificador conseguía una ganancia significativa empleando tres etapas directamente acopladas.

La clave del éxito de ese circuito debe buscarse en la introducción de nuevos conceptos que todavía hoy están en uso, tales como la replicación de intensidad a través de los llamados “espejos” de corriente para polarizar eficientemente los diferenciales, o la conversión de diferencial a salida referenciada a tierra. Por cierto, aunque *Fairchild* patentó ambos conceptos, nunca los defendió frente a terceros.

---

58. Un amplificador operacional es un amplificador diferencial de muy alta ganancia; con él es posible construir circuitos complejos tales como filtros; un filtro, a su vez, es un circuito capaz de amplificar selectivamente una señal, en función de la frecuencia de ésta.

Otros competidores se lanzaron también a producir amplificadores operacionales integrados, pero la calidad de sus productos resultó inferior y sus precios demasiado altos. El dominio del mercado por parte de Fairchild fue absoluto, llegando a vender 5000 piezas semanales del 709.

Sin embargo, Widlar no se consideraba bien pagado en Fairchild, por lo que, junto a Talbert, abandonó esta compañía a finales de 1965. Una semana más tarde, Fairchild contrató a un joven británico, David Fullagar, quien diseñó el primer amplificador operacional integrado con compensación interna<sup>59</sup>, el mA741, terminado en 1968. Usaba dos etapas en lugar de las tres del 709, resultando más estable. Sería el circuito integrado más vendido y empleado de la historia<sup>60</sup>.

Talbert comenzó a negociar en 1966 con una compañía que, fundada en 1959, estaba en un serio intento de reorganización para focalizarse en la producción de circuitos integrados; se trataba de *National Semiconductors*, a la que se acababan de incorporar un grupo de directivos de *Fairchild*, quejosos de la manera en que Noyce y Moore estaban gestionando la compañía y, sobre todo, su departamento de I+D. La competencia empezaba a ser muy dura y habían surgido empresas tanto en EEUU –*Philco*, *Signetics*– como en Japón –*Nippon Electric*, *Hitachi*, *Fujitsu*, *Matsushita*, *Toshiba*– que aspiraban a liderar el mercado.

Widlar y Talbert continuaron con algunas de sus ideas brillantes y, en poco tiempo, diseñaron el primer regulador de tensión integrado de la historia, el LM100, que se comenzó a comercializar en 1966. Su siguiente paso fue, en 1967, diseñar el LM101, un amplificador operacional con prestaciones mucho mejores que las del 709<sup>61</sup>. A este circuito le siguió inmediatamente el LM101A, primer circuito de esta clase que combinaba transistores bipolares y unipolares, así como un nuevo dispositivo, el transistor lateral de colector múltiple (1968). Ese mismo año, ambos investigadores desarrollaron los transistores *super-beta*, con mucha capacidad de ganancia en corriente que los transistores ordinarios.

Desafortunadamente, Widlar era un genio pero también un excéntrico e indisciplinado empleado que causaba con frecuencia problemas fuera y dentro de la compañía. Existían fuertes presiones a su favor y en su contra y, finalmente, él y Talbert renunciaron en 1970. Para entonces, National había abierto una nueva línea de circuitos integrados MOS digitales. Widlar se retiró a Puerto Vallarta, México, convertida por Hollywood en lugar de retiro de muchos hippies y bohemios de todo el mundo<sup>62</sup>.

---

59. Debido a su alta ganancia, los amplificadores operacionales requieren ser usados en una configuración realimentada y precisan de una compensación en frecuencia. Esto hace su uso complejo. Al introducir una compensación interna, por medio de una resistencia y un condensador integrados, se facilitaba su uso grandemente.

60. Es difícil conseguir datos precisos al respecto, pero basta tener en cuenta que aún hoy, casi 50 años después de su introducción en el mercado, se fabrican y venden versiones actualizadas de este chip.

61. Su ganancia en tensión en lazo abierto era de 100.000, con una mejora de 15:1 en la corriente de polarización y una protección de la etapa de salida contra cortocircuitos.

62. La película “La noche de la iguana”, dirigida por John Huston y basada en una obra de Tennessee Williams, fue rodada en Puerto Vallarta y convirtió el lugar en punto de atracción.

La situación se prolongó hasta 1974, en que National y Widlar se reconciliaron, aunque Bob Widlar continuó residiendo en México durante bastante tiempo y haciendo frecuentes viajes a EEUU para discutir sus ideas<sup>63</sup>. Pese a ello, sus contribuciones continuaron siendo de gran valor para los productos analógicos de *National Semiconductors*.

Lo que resulta más curioso es que el trabajo necesario se hacía con papel, lápiz y ecuaciones, ya que no existía ninguna herramienta que permitiera realizar simulaciones. Por ejemplo, en esta época, Widlar estudió la ruptura secundaria de los transistores bipolares, resolviendo las complicadas ecuaciones de continuidad ¡sólo con su regla de cálculo!

Pese a todo ello, la idea que apuntábamos más arriba de que los circuitos integrados analógicos nunca serían una fuente seria de negocio, estaba muy arraigada en la industria de finales de los sesenta y primó a lo largo de los setenta. En términos de complejidad, hacia 1978 los confines digitales los marcaba el microprocesador 68000 de Motorola, con unos 80.000 transistores, mientras que los circuitos analógicos integrados más complejos estaban en el orden de la treintena de transistores por chip.

El microprocesador eclipsó, con las nuevas posibilidades que abría, a cualquier otro tipo de circuito integrado. Sólo cuando, más tarde, se buscaron aplicaciones en las que las comunicaciones o las interacciones con el medio empezaran a ganar importancia, se demostraría que el nicho analógico, aunque menor en tamaño, podía ser mucho mayor en términos de valor añadido a un producto

La década de 1970 significó el asentamiento de los circuitos integrados como componentes fundamentales de casi cualquier sistema electrónico. Hemos prestado atención preferente hasta ahora a la evolución de los elementos básicos que constituyen tales sistemas y a su evolución, desde las primeras válvulas termoiónicas a la integración masiva de transistores. Asimismo, nos hemos centrado en las grandes aplicaciones que fueron, hasta ese momento, las que forzaron el desarrollo electrónico. Pero ya es hora de que abramos el campo de visión y repasemos otras aplicaciones que, en esa década de los setenta, ya habían nacido o estaban naciendo, aunque entonces pasaran desapercibidas.

El período que va del 4 de abril de 1975 al 1 de abril de 1976 es especialmente interesante porque en él surgen dos pequeñas compañías que van a tener una influencia capital sobre uno de los grandes motores de la Electrónica. Nos referimos, respectivamente, a *Microsoft* y a *Apple*. Ambas prestan atención a la Informática, aunque van a condicionar el desarrollo de los sistemas electrónicos, primero en el ámbito de la computación –en sentido amplio– y, más tarde, en otros ámbitos como el de la telefonía móvil, por ejemplo.

Para esa fecha, 1975, se habían producido importantes avances en ese campo de los computadores. Se había desarrollado el concepto de sistema operativo para facilitar su uso y habían ido apareciendo lenguajes de computación: FORTRAN (1957), BASIC (1964), PASCAL (1971) o C (1974). También estaba ya disponible un sistema operativo

---

63. Una anécdota que refleja la personalidad de Bob Widlar es que sus pasos por la frontera le acarrearón muchos problemas con la guardia fronteriza, ya que él solía contestar que “no trabajaba” a la pregunta del formulario habitual.

que terminaría convirtiéndose en un estándar; nos referimos a UNIX, debido a Bell Labs e introducido en 1969. Igualmente había irrumpido en el mercado la primera calculadora programable de bolsillo (*Hewlett-Packard*, 1974)<sup>64</sup>.

En esos años, los cuellos de botella para diseñar computadores portátiles se debían a la tecnología de interacción hombre-máquina (teclado, terminal de vídeo<sup>65</sup>, discos y, en general, almacenamiento masivo) y a la falta de baterías de pequeño tamaño y alto rendimiento. Eso hizo que se explorasen nuevas vías en cada uno de esos campos y fueran apareciendo novedades como los cristales líquidos o los LEDs (ambos para nuevas pantallas)<sup>66</sup>.

El almacenamiento a gran escala y, sobre todo, la capacidad de poder guardar de forma cómoda y portable programas de usuario que aumentaran la eficiencia de los computadores, es otro de los retos que se tuvieron en cuenta en ese período. Habían nacido así los grandes sistemas de almacenamiento en cinta magnética que se emplearon desde comienzos de los años 50 y que culminaron con el *floppy* o *diskette*, un disco magnético regrabable de pequeño tamaño, introducido en 1970 por IBM y que permitía a cada usuario mantener de forma cómoda datos y programas fuera del ordenador. Esta técnica fue evolucionando en tamaño y prestaciones entre ese año y 1980<sup>67</sup>. La investigación en almacenamiento magnético en cinta o disco condujo a la introducción del grabador de vídeo, propuesto en los años 50 y cuyas primeras versiones estaban muy alejadas del gran público por su alto coste y gran tamaño<sup>68</sup>. Relacionado con este desarrollo de la grabación sobre medio magnético estaban los sistemas de grabación portátiles en un sistema de cinta estrecha que se denominó popularmente *cassette*. Inventada por Lou Ottens, de *Philips*, en 1962 como soporte para grabaciones de audio, significó un cambio importante en los usos y costumbres sociales. Durante más de veinte años fue el procedimiento favorito del público para intercambiar música.

---

64. Las primeras calculadoras electrónicas datan de 1963, pero eran equipos de sobremesa; la llegada de los circuitos integrados propició una considerable reducción de tamaño a partir de 1970, llegándose en 1971 a la primera calculadora basada en un único chip, debida a la colaboración entre Pico Electronics y General Instruments.

65. Las pantallas de ordenador usaban una tecnología similar a la de los televisores de la época, estando basadas en tubos catódicos de gran tamaño.

66. Los LEDs (Diodos Emisores de Luz) aparecen en 1960; los cristales líquidos, en 1975. Los primeros son diodos semiconductores que presentan electroluminiscencia y los segundos son unas sustancias que permiten (o bloquean) el paso de luz polarizada entre dos electrodos. Muchos años más tarde su descubrimiento han permitido las tecnologías actuales usadas en los terminales de ordenador y en los televisores.

67. Los primeros diskettes eran de 8 pulgadas (200 mm) aunque ya en 1972 se estandarizaron los de 5 y cuarto (133 mm) y, posteriormente, los de 3,5 (90 mm). La capacidad máxima de almacenamiento que llegaron a tener fue de 875 KB para un diskette de 3,5 y grabación a doble cara. Hoy están en desuso, sustituidos por los USB, pero fueron muy populares durante casi tres décadas.

68. Entre 1952 y 1965 aparecen distintas tecnologías para grabar imágenes. Hasta que Sony no introdujo en 1965 su modelo CV-2000 no puede decirse que existiera en el mercado un grabador de imágenes de uso doméstico. Las primeras grabadoras comerciales usaban cinta magnética de 2 pulgadas (6 cm).

Se había comenzado también a considerar seriamente la posibilidad de interconectar computadores, habiéndose introducido tanto el *modem*<sup>69</sup> como la idea de *Ethernet*<sup>70</sup>. En ese mismo sentido, se estudiaban opciones que permitieran mayores velocidades de intercambio, como por ejemplo el uso de la fibra óptica para transmitir información<sup>71</sup>.

La investigación para extender a frecuencias ópticas muchos conceptos electrónicos (con la idea de conseguir mayor velocidad de operación y/o de transmisión) no se limitó a la fibra óptica. Se habían desarrollado amplificadores ópticos e incluso circuitos integrados, así como se había concebido y desarrollado el primer láser, otra vez debido al trabajo de investigación de físicos e ingenieros de *Bell Labs*<sup>72</sup>. Con el láser nace en esos años una nueva ciencia, la Fotónica, extensión natural de la Electrónica al emplear frecuencias visibles para procesar y transmitir información.

Pero los sistemas electrónicos que se habían ido patentando para mediados de los años setenta iban mucho más allá. Algunos tuvieron un éxito inmediato y significaron una importante contribución industrial. A estos pertenecen la fotocopiadora, el fax o el escáner, por ejemplo<sup>73</sup>.

Pero también habían aparecido para entonces algunos otros sistemas electrónicos cuyas patentes pasaron desapercibidas y quedaron en el olvido durante mucho tiempo. Nos referimos al teléfono móvil, concebido por John F. Mitchell y Martin Cooper de Motorola en 1973 y reducido a una curiosidad hasta la década de los noventa, y a la fotografía digital, inventada por Steven Sasson un ingeniero de Eastman Kodak, en 1975, empleando un sensor de imagen basado en un dispositivo acoplado por carga<sup>74</sup>. Ambos inventos se anticipaban a la tecnología de su tiempo; respecto al primero, transmitir sin cables, pero siguiendo la filosofía de marcación del teléfono resultaba mucho más complejo que usar la radio y requería un infraestructura de soporte inexistente; en cuanto al segundo, el prototipo de cámara que resultó era comparable en tamaño y peso a las antiguas cámaras de fotógrafo ambulante y, por tanto, no valió la pena buscarle lugar en el mercado de la fotografía<sup>75</sup> en ese momento.

---

69. Un modem es un sistema modulador-demodulador que permite codificar y decodificar información digital y transmitirla sobre líneas telefónicas o cualquier otro cable. Introducido por MIT y Bell Labs en 1950, sus velocidades de transmisión iniciales suenan ridículas. En efecto, frente a las tasas actuales que podemos contratar de decenas de megabits por segundo, los primeros módems eran capaces de transmitir a 300 bits por segundo, esto es, unas 30.000 veces menos.

70. Ethernet fue una idea desarrollada por Robert Metcalfe en su tesis doctoral de 1973; dos años más tarde fue patentada por Xerox. Esencialmente se trata de una tecnología que permite unir ordenadores formando redes cuando éstos están físicamente próximos (a decenas de metros). En principio se empleaba sólo un cable especializado, aunque hoy día se emplean ampliamente las conexiones Wi-Fi.

71. En 1966, Charles K. Kao y George Hockham propusieron por primera vez el uso de fibra óptica en los Laboratorios STC (STL) en Harlow, Inglaterra.

72. En 1957, Charles Hard Townes y Arthur Leonard Schawlow, desarrollaron el concepto de láser. LASER son las siglas en inglés de Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación.

73. Dejando aparte antecedentes diversos, la primera fotocopiadora fue desarrollada por Xerox en 1959; el primer fax fue también patentado por Xerox en 1964; el primer escáner plano fue comercializado en 1975 por Kurzweil Computer Products

74. Un dispositivo acoplado por carga o CCD (en inglés Charge-Coupled Device) es en esencia un componente electrónico formado por condensadores MOS acoplados entre sí.

Con todo, lo que parece estar en el ojo del huracán por esos días, como ya hemos comentado, es la digitalización de la Electrónica, especialmente el desarrollo de computadores que puedan ser de uso del gran público. Algunas empresas comienzan a visualizar que estos ordenadores, hasta ese momento reducidos a grandes corporaciones, pueden llegar a ser los sustitutos de radios y televisores como productos de gran consumo, si se introducen en el ámbito doméstico.

No olvidemos que en 1975 ya estaba disponible el primer computador personal, el *Altair 8800*. Pero, la pregunta que muchos se hacían era ¿para qué se iba a usar un computador en ese ámbito doméstico? Las primeras respuestas a esa pregunta vinieron de un sector inesperado, el de los juegos. En efecto, en 1972, la compañía Atari pone en el mercado su *Ping-Pong* y, unos meses después, su *Computer Space*. Se trataba de dos juegos que hoy nuestros hijos y nietos despreciarían por su simplicidad pero que, en aquel momento, significaron una auténtica revolución. Sobre todo, cuando, en 1975, aparece la primera consola doméstica de Atari. Entonces nadie lo imaginó, pero la industria de los videojuegos estaba siendo alumbrada.

Pronto van apareciendo los precursores del actual ordenador personal. En 1976, el Apple I; en 1977 el Apple II, el Commodore PET y el TRS-80; en 1980 el Commodore 64 y, en 1981, el Computador Personal (PC) de IBM.

En este contexto no es de extrañar que, durante un largo período de tiempo la industria electrónica se centrara en los computadores, tanto en microcontroladores (circuitos integrados que incorporaban todos los elementos de un ordenador en un chip) como en computadores multi-chip. Pero los objetivos estaban claros y todavía perduran: aumento de la funcionalidad, de la potencia de cómputo y de la velocidad de operación, reducción del consumo, incremento de la fiabilidad, etc.

Tras la aparición del PC, su introducción resulta al principio lenta debido a la falta de conocimientos básicos para usarlo por parte del gran público. La comercialización en 1981 del primer sistema operativo de *Microsoft*, el MS-DOS 1.0, abre nuevas puertas al uso del PC pero la carencia de flexibilidad y los numerosos problemas de esta primera versión no facilitan un uso generalizado. Posteriormente, en 1983, *Microsoft* lanza la primera versión de su procesador de textos, el programa Word, que amplía el universo de uso a los entornos de oficina. No obstante, habrá de transcurrir una década y deberán aparecer opciones más “amigables” antes de que se generalicen estos computadores personales. A ello contribuirán *Apple* con su Lisa (1982) y con su Macintosh (1984) – dotados de un interfaz gráfico– y, sobre todo, la introducción de sistemas operativos más robustos –menos propensos a fallos inesperados– y de uso más fácil en los PCs, como Windows 1.0 (1983). Sucesivas versiones han ido haciendo evolucionar estos sistemas operativos y sus interfaces gráficos hasta la versatilidad que tienen actualmente.

---

75. La ciencia-ficción había predicho el advenimiento del teléfono móvil desde mucho tiempo atrás. En 1948, Robert Heinlein habla en su novela *Cadete Espacial* de un teléfono de bolsillo. Diez años después, Arthur C. Clarke en un ensayo hablaba de "un comunicador personal, tan pequeño y compacto que puede llevarse encima". Clarke escribió: "vendrá el tiempo en que llamaremos a cualquiera en cualquier parte del mundo simplemente marcando un número" Clarke predijo incluso en sus *Perfiles del Futuro* el GPS (Global Positioning System).

Pero no es nuestro objetivo hablar de la vertiente informática que permite utilizar eficazmente los computadores, sino referirnos a los chips con los que están contruidos y que han contribuido a su evolución.

Por supuesto, reducir el tamaño de los transistores, componentes básicos elementales de los circuitos integrados, era un punto fundamental. Pero eso debía hacerse teniendo presentes otros requisitos igualmente importantes, tales como la potencia disipada, la velocidad de operación, el coste y la fiabilidad. El coste se demostró dependiente de varios factores: a) la inversión necesaria para diseñar un chip, b) su fabricación, c) las pruebas necesarias para certificar su funcionalidad y, desde luego, d) los costes de poner el producto en un mercado cada vez más competitivo.

La partida más gravosa correspondía al proceso de fabricación en sí mismo. La mejor manera de reducir costes se demostró que debía basarse en compartir gastos entre todos los chips que se fabricaban en una misma hornada. Mientras más chips se fabricasen simultáneamente, más barato saldría el precio unitario. Ya hemos hablado sobre las técnicas de producción de chips, basadas en un procedimiento físico-químico llamado fotolitografía, muy similar en esencia a los procesos fotográficos y a los de grabado. Las capas que se van superponiendo corresponden a modificaciones del semiconductor de base, organizadas en lo que se conoce como proceso *epitaxial*<sup>76</sup>. Eso implica pasos sucesivos de proceso que requieren unos hornos con temperatura estabilizada y unas condiciones ambientales muy estrictas. Este procedimiento de fabricación tiene lugar empleando como base un sustrato u “*oblea*” de material semiconductor adecuadamente limpia y pulida, cuyo espesor es de algunos cientos de micras. En cada hornada se trabaja con un número determinado de obleas que viene condicionado por la capacidad de los hornos.

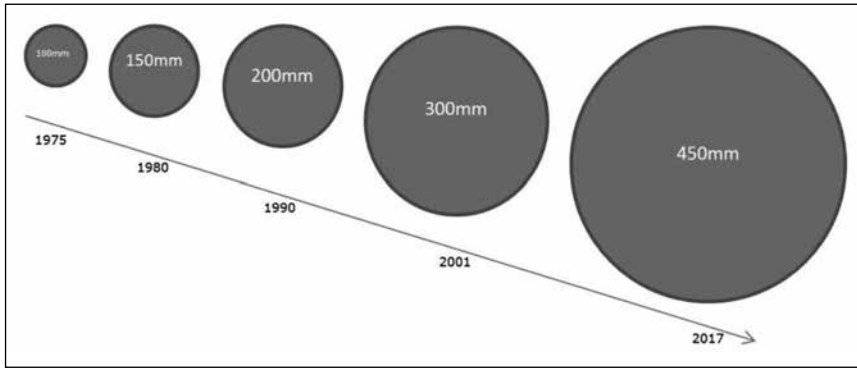
Aparecen así dos opciones complementarias para fabricar simultáneamente un número mayor de chips; aumentar la capacidad de los hornos (para permitir un número mayor de obleas) o hacer mayores las obleas de base en las que se “construyen” los chips. Por problemas diversos, la segunda opción es la que se ha venido considerando más conveniente. En 1975, el tamaño máximo de oblea usado por la industria correspondía a un diámetro de 100 mm; la Figura 13 nos da una idea de la evolución temporal de dicho diámetro. De esta figura puede inferirse que otra manera de aumentar el número de circuitos por oblea es hacer más pequeños los chips para que quepan más en el mismo espacio. Esa ha sido, en efecto, la tendencia desde entonces, según había predicho la *Ley de Moore*. Aprovechando el concepto de fotolitografía, se ha ido tratando de reducir las dimensiones de los componentes –fundamentalmente de los transistores– jugando a una reducción óptica de los patrones dibujados en el semiconductor. Este procedimiento conlleva limitaciones importantes de las que se hablará posteriormente.

---

76. La primera máquina para producir industrialmente circuitos integrados usando un proceso epitaxial se debe a Eric O. Ernst, Donald J. Hurd y Gerard Seeley, quienes la patentaron en 1965 para IBM.



**FIGURA 10**  
**EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL TAMAÑO DE UNA OBLEA USADA EN LA FABRICACION DE CHIPS**



En el fondo esto era lo que había predicho la *Ley de Moore*, la reducción continuada del tamaño de los componentes. De esta manera, los microprocesadores y las memorias (que han sido los componentes digitales esenciales) han ido evolucionando desde las densidades de 1975 hasta las de nuestros días. Desde el INTEL 4004 de 1971, constituido por unos 2.300 transistores en una tecnología PMOS de 10 mm sobre obleas de 50 mm y una frecuencia de reloj de 740 KHz, hasta los modernos microprocesadores multi-núcleo como, por ejemplo, la 3ª generación del Intel Core Processor, introducida en 2012, que incluye más de mil millones de transistores en una tecnología de 22 nm construidos sobre obleas de 300 mm y con una frecuencia de reloj de 2,9 GHz. En ese sentido, Apple tiene en catálogo un chip en tecnología de 5 nm con alrededor de 60 mil millones de transistores e INTEL ha anunciado otro en 7 nm con 100 mil millones de transistores.

Algo parecido ha ocurrido con las memorias semiconductoras. En 1975 comenzaban a aparecer las memorias de 4 Kbits, mientras que ahora los chips de memoria de 4 GBits abundan en el mercado. Si tenemos en cuenta el precio actual resulta que el bit de memoria flash puede costar en una tienda la diezmilésima parte de un euro.

Con un ritmo de cambio tan elevado, no es posible seguir paso a paso todos y cada uno de los hitos de esa evolución. Baste señalar la introducción entre 1974 y 1976 de una serie de micros de 8 bits (8080 de *INTEL*, 6800 de *Motorola*, 6502 de *MOS Technology* o Z80 de *Zilog*) operando con ciclos de reloj en el orden de algunos megahercios (MHz), que fueron los primeros realmente versátiles y a los que pronto siguieron otros muchos con análogas características. Tras algunos procesadores de 12 y 16 bits<sup>77</sup>, *Motorola* puso en el mercado en 1979 su potente familia 68000, procesadores de 32 bits, de inmediato seguidos por numerosos productos similares de otros fabricantes, que

<sup>77</sup>. La familia 6100 de *Intersil* estaba basada en procesadores de 12 bits. El primer procesador conocido de 16 bits fue el IMP-16 de *National Semiconductor*, aparecido a comienzos de 1973.

permitieron la gran explosión del ámbito de los ordenadores personales y, sobre todo, de sobremesa a partir de 1985. El 68000 fue utilizado por IBM para PCs y para ordenadores profesionales; se empleó en los *Lisa* y *McIntosh* de Apple, así como en el *Atari ST* y el *Amiga* de Commodor.

En la década de 1980 estalló la que suele denominarse “guerra de los microprocesadores”, que terminó con la mayoría de los fabricantes y se concentró finalmente en dos bandos bien definidos: INTEL contra Motorola, del que resultó triunfante la primera. Los procesadores más característicos fueron, por parte de INTEL, el iAPX 432 (1981) y el 80286<sup>78</sup> (aparecido en 1982); por parte de Motorola, el MC68020, fabricado a partir de 1984<sup>79</sup>. Con la introducción del primer procesador *Pentium* de INTEL en 1993, la balanza se había decantado a favor de esta empresa, que ha ido introduciendo sucesivamente sus *Pentium Pro* (1995), *Pentium II* (1997), *Celeron* (1998), *Pentium III* (1999), *Pentium 4* (2000), *Core 2 Duo* (2006), *Atom* (2008) ó su 3ª generación de *Core Processor* (2012), entre otros pasos intermedios. La Tabla 9.I pretende darnos una idea de esa evolución en los chips que han conformado los ordenadores personales que la mayoría de nosotros hemos venido utilizando en los últimos veinte años.

**TABLA 1**  
**EVOLUCIÓN DE LOS MICROPROCESADORES DE INTEL**

Chip µProcesador	Año	Reloj (GHz)	Nº Trans. (millon.)	Tecnol. (nm)
Pentium Pro	1995	0,2	5,5	350
Pentium II	1997	0,3	7,5	250
Celeron	1998	0,266	7,5	250
Pentium III	1999	0,6	9,5	250
Pentium 4	2000	1,5	42	180
Core 2 Duo	2006	2,66	291	65
Atom	2008	1,86	47	45
Core Processor (3ª gen.)	2012	2,9	1.400	22

Para entender el significado de estas cifras vale la pena tratar de extrapolarlas a un sector que nos es tan familiar como el del automóvil. Si en los coches se hubiera producido una evolución similar, hoy tendríamos unos autos que cumplirían con los datos

78. INTEL usó y sigue usando desde ese momento su concepto de arquitecturas con un conjunto de instrucciones compatible para la mayoría de sus chips, incluso para los actuales. Otras compañías también se han acogido a hacer compatibles sus procesadores con la arquitectura x86 de INTEL.

79. Para dar al lector una idea comparativa, el 80286 trabajaba a una frecuencia de reloj de 6 MHz y utilizaba 134.000 transistores en tecnología de 1,5 µm. El MC68020 trabajaba a una frecuencia máxima de 33 MHz y estaba formado por unos 190.000 transistores en tecnología HCMOS de 2,25 µm.

de la Tabla 9.II, obviamente muy alejados de nuestra realidad presente y, seguramente, futura. Si leemos la Tabla con atención nos daremos cuenta de que dos billones de automóviles deberían costar 1 céntimo en total; podríamos ir a una velocidad un millón de veces superior a la de la luz; no llenaríamos el depósito más que una vez en la vida y el peso de uno de nuestros autos sería de 0,34 microgramos.

**TABLA 2**  
**EVOLUCIÓN FIGURADA DEL AUTOMÓVIL SI HUBIERA SEGUIDO LA MISMA LEY**  
**DE ESCALADO QUE LOS CHIPS**

Parámetro	Ford T (1913)	Actualmente
Velocidad (Km/h)	80	$240 \times 10^{18}$
Eficiencia (Km/l gasolina)	8,5	$25 \times 10^{18}$
Peso (Kg)	1000	$343 \times 10^{-18}$
Espacio maletero (litros)	500	$1.500 \times 10^{18}$
Coste (€)	15.000 (en valor de 1993)	$5 \times 10^{-15}$

Aunque *INTEL* tiene una posición dominante en el mercado de ordenadores personales que emplean sus chips, existen otros competidores que han ido introduciendo microprocesadores con una importante cuota de mercado de los que hablaremos más abajo.

Antes tenemos que pararnos a concluir dos observaciones interesantes. En primer lugar, que la Ley de Moore ha resultado ser una proyección fiable a lo largo de casi cuatro décadas. Pero, en segundo lugar, que hay otros parámetros interesantes en esta progresión que también han sido afectados; nos referimos a la velocidad de operación (o, lo que es lo mismo, a la frecuencia de reloj) y al tamaño de los transistores. La cuestión está en saber si existe alguna correlación entre esos parámetros y en determinar si eso afecta a la misma evolución de la que estamos hablando. La respuesta es simple: para conseguir aumentar la funcionalidad del chip hay que aumentar el número de transistores; esto conlleva obviamente reducir el tamaño de estos transistores y aumentar su velocidad de operación. Pero se produce un efecto perverso: aumentar la velocidad implica aumentar la potencia disipada; como el tamaño disminuye, la densidad de potencia disipada por unidad de superficie de semiconductor se hace cada vez mayor provocando calentamiento e incluso destruyendo el propio semiconductor. Luego, se genera un mecanismo que hace cada vez más difícil proseguir con esta carrera. A esto hay que añadir que los efectos de segundo orden se hacen más significativos, exigiendo modelos de circuito cada vez más complejos, lo que dificulta el diseño de nuevos sistemas, alargando los tiempos de simulación y, finalmente, su puesta en el mercado.

Las estrategias para resolver eficazmente este problema han sido varias. La primera, reducir los voltajes de polarización usados en los chips; la segunda, emplear más de una CPU para conseguir mayor rendimiento con menores velocidades de operación; la tercera, recurrir a arquitecturas de ordenador más eficientes, con un número reducido de instrucciones y capacidades mejores para direccionar la memoria.

De esta manera han ido apareciendo alternativas a los chips de INTEL<sup>80</sup> que compiten con cierto éxito, sobre todo en nichos específicos en los que presentan ventajas significativas. Por ejemplo, AMD irrumpió en 1996 con el procesador K5 que fue la primera competencia seria al Pentium<sup>81</sup>. Posteriormente el K7 (1999), conocido como Athlon, y más tarde sus chips Opteron, Phenom, Bulldozer o Bobcat son ejemplos de la supervivencia de AMD a lo largo de los años. Más allá de la competencia a nivel general, el hecho de que AMD esté también en el mercado de los procesadores gráficos<sup>82</sup> ayuda a mantener su posición industrial.

Aparte del sector de gráficos, se han desarrollado chips específicos para procesadores con un conjunto interno de instrucciones más eficiente. Inicialmente se desarrollaron para máquinas que usaran el sistema operativo UNIX, aunque actualmente se emplean en otros contextos. En este sector, dominan las empresas ARM y MIPS, con chips de 32 y 64 bits, aunque INTEL, AMD y otros fabricantes también compiten con afán de protagonismo. Los fabricantes de consolas son los que más se benefician de estos chips y de los de aceleración de gráficas, ya que para ellos lo más importante es la velocidad de manejo de figuras en 2 y 3 dimensiones. Las cifras de producción de chips de microprocesadores por año están cercanas a los cien millones, lo que da una idea del volumen de la correspondiente actividad industrial y comercial. El pasado año las compras totales de chips alcanzaron 483,000 billones (americanos) de dólares, con un crecimiento continuo anual del 9,2 %, lo que lleva a predecir que en 2029 el mercado alcanzará los 893.000 billones, incluyendo chips de IA.

De todo lo visto hasta ahora se podría concluir que la Electrónica ha estado y sigue estando totalmente focalizada en la generación de sistemas digitales cada vez más sofisticados, orientados a una gran diversidad de productos, aunque con claro predominio de los computadores –incluyendo las vídeo consolas–. Al avance en la integración de procesadores y memorias hay que añadir la invención de nuevas técnicas de almacenamiento masivo magnético y óptico que han dado lugar a complementos tan útiles y utilizados como los DVD, discos Blu-Ray o tarjetas de memoria y USB.

Hemos hablado extensamente del empleo de la Electrónica para mejorar nuestra capacidad de cómputo, pero qué ha ocurrido con las comunicaciones. Al lector se le despertará en este punto una pregunta obvia: ¿y la telefonía celular?, ¿no tiene la Electrónica un papel en ella? ¿También es totalmente digital? Intentaremos dar respuesta a esas cuestiones.

---

80. Como cabe imaginar, los litigios judiciales por violación de patentes o acuerdos entre INTEL y AMD han sido frecuentes en los últimos 25 años.

81. El nombre K5 fue escogido con cierto grado de ironía; procede de Kriptonita, el planeta de Superman, el conocido héroe del cómic, y el 5 hace referencia a Pentium. Se deslizaba así la idea subliminal de que el K5 iba a actuar como la kriptonita sobre los chips estrella de INTEL de ese momento. Este procesador apareció en el mercado casi al mismo tiempo que el estándar USB (Universal Serial Bus) que tanto utilizamos hoy día.

82. Son procesadores específicos que hoy día se emplean en todos los ordenadores para manejar y acelerar los gráficos en las pantallas. Su estructura y constitución interna son muy diferentes de los de un microprocesador de carácter general.

Ya hemos apuntado las razones principales de ese desarrollo, pero, desde una perspectiva puramente técnica, hay que subrayar que los sistemas digitales se benefician de imponer unas restricciones muy leves a los componentes electrónicos, de ahí su éxito. En primer lugar, un sistema digital está basado en el uso de la lógica binaria y puede construirse casi por completo con transistores, los componentes que menor área precisan y que se escalan mejor. En segundo lugar, efectos como la imprecisión, el ruido, la variabilidad quedan absorbidos por la misma naturaleza de esos componentes y por las propiedades de la lógica booleana o binaria. De esta manera, no es de extrañar que la revolución digital fuese el primer gran paso de la Electrónica del circuito integrado.

Sin embargo, las comunicaciones han seguido configurando una vertiente importante en el mundo de las tecnologías electrónicas. La idea de modernizar el viejo concepto de la telefonía a través de hilos, reemplazándolo por una comunicación más cercana a la radio, aunque conservando la gran facilidad de la marcación alfanumérica, flotaba en el ambiente desde los años setenta del siglo pasado<sup>83</sup>; en este sentido, ya vimos que el concepto de telefonía celular se había patentado por esa época. ¿Qué hacía falta para que madurase la idea y pudiera llevarse a la práctica?

Al contestar a esta cuestión hay que distinguir dos vertientes bien diferenciadas. Una hace referencia a la infraestructura necesaria para permitir enlazar los nuevos teléfonos entre sí y permitir la conexión por un procedimiento análogo al de la telefonía convencional. La otra vertiente hace referencia a los problemas puramente electrónicos para posibilitar nuevos terminales telefónicos. Aunque nuestro punto de vista aquí es, desde luego, lo que concierne a esta segunda vertiente, conviene que nos paremos a entender a qué tipo de infraestructura nos estamos refiriendo.

La telefonía “clásica” conecta terminales (auricular+micrófono) por medio de una red de cables cuya conexión controlan las centrales telefónicas. En la “nueva” telefonía se pretendía eliminar los cables y dotar al terminal (en este caso, un comunicador por radio) de la misma facilidad de conexión, pero, lógicamente, sin cables. Para eso es necesario colocar antenas que puedan captar la señal de cada terminal y “buscar” al terminal al que se está llamando. La solución encontrada consiste en la instalación de una red de antenas que cubren el territorio y que –usando ordenadores para ello– permiten establecer la conexión entre dos o más abonados con independencia de dónde se encuentren ambos abonados. Desde luego, ese despliegue de antenas ha exigido además desarrollos tecnológicos nuevos relacionados con la naturaleza electromagnética de la transmisión y ha obligado a importantes inversiones a nivel mundial.

Al lector le resultará obvio entender que mientras no se llevó a cabo este nuevo tipo de infraestructura telefónica no fue posible que el concepto de teléfono sin cables pudiera extenderse. Hoy día estas antenas forman parte del paisaje de cualquier lugar.

Pero, aclarado este punto, tenemos que volver a lo que más nos importa aquí: la contribución de la Microelectrónica a este proceso. Lo primero que conviene plantearse

---

83. Tanto el cine como el comic habían predicho que el teléfono móvil existiría. En una tira de enero de 1946, Dick Tracy usó por primera vez su teléfono de muñeca; Batman empleó su batphone en la serie deTV de 1966 y el Superagente 86 (Maxwel Smart) se comunicaba por medio de su zapatofono desde 1965.

es cómo debían ser los nuevos terminales telefónicos. Por supuesto, deberían mantener la opción de comunicarse por voz; pero, dada la madurez de otras tecnologías, se podía pensar en añadir facilidades gráficas y de vídeo e incluir aplicaciones que pudieran aportar mucho valor a este nuevo estilo de intercomunicación. Eliminados los cables, se hacía necesario recurrir a baterías que se pudiesen recargar cómodamente; el peso y el volumen del terminal deberían ser pequeños y, por supuesto, ya que los procesadores se estaban demostrando tan versátiles, idear maneras de que pudieran servir también para hacer atractivos los nuevos teléfonos.

Pero, para hacer esto existían serios problemas. Uno era de carácter eléctrico: las baterías. Pese a que la industria de los audífonos, la de los radios a transistores o la de la fotografía<sup>84</sup> habían potenciado la investigación, propiciando nuevas tecnologías que habían reducido peso y tamaño aumentando la duración, esto no se había conseguido para las baterías recargables, al menos no en el mismo grado. No se trataba de una limitación electrónica, pero era un condicionante importante.

Sin duda, lo esencial para poder llegar a un terminal telefónico adecuado era resolver la integración eficiente de componentes analógicos, ya que en los mecanismos de comunicación el ser humano utiliza un sistema continuo de transferencia de información empleando su boca y su oído, por ejemplo. Pero las tecnologías para construir chips digitales no permitían integrar componentes tales como condensadores, resistencias o inductores –necesarios en este caso– o, si lo permitían, éstos ocupaban una superficie enorme dentro del chip<sup>85</sup>.

Por otra parte, los circuitos analógicos son susceptibles a influencias tales como el ruido eléctrico, las variaciones térmicas, incluso a la falta de simetría, lo que hacía necesario el desarrollo de nuevas técnicas que permitieran su diseño y construcción en forma completamente integrada.

A finales de la década de 1970 y, sobre todo, en la década siguiente, diversos departamentos universitarios realizaron un gran esfuerzo por posibilitar la integración de esos componentes no digitales en tecnologías MOS y CMOS, para compatibilizar tales componentes con el mundo digital. Una primera alternativa consistió en el desarrollo de una técnica que permitía “simular” bobinas empleando el concepto de filtro activo. Se desarrolló todo un cuerpo teórico que posibilitó realizar circuitos empleando amplificadores operacionales, resistencias y condensadores. Diversos investigadores europeos hicieron contribuciones teóricas y prácticas de importancia.

Con todo, el sueño de una integración compatible con las líneas de fabricación digitales seguía estando lejos<sup>86</sup>. A partir de 1980, en la Universidad de California en Ber-

---

84. Aunque la fotografía siguiera siendo “analógica” hasta comienzos del siglo XXI, las cámaras fotográficas incorporaban cierta electrónica desde los años ochenta del siglo XX. Fotómetros, sistemas de autofocus y algunos otros elementos hicieron necesaria la incorporación de baterías a las cámaras réflex, por ejemplo.

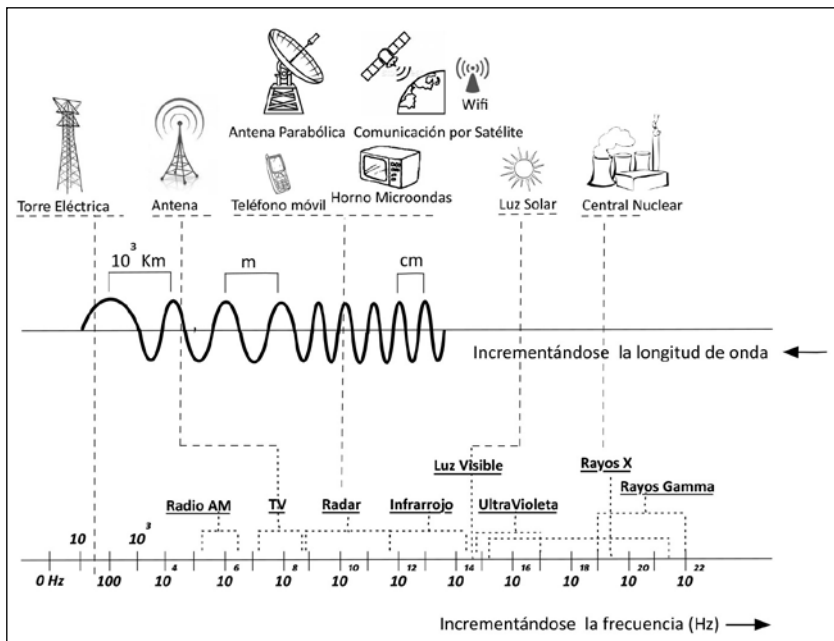
85. Por ejemplo, un simple condensador de 1 nF (la mil millonésima parte de un Faradio) podía ocupar la misma superficie que un millar de transistores.

86. Por distintos motivos, sobre todo económicos, no interesaba recurrir a tecnologías especiales exclusivamente para chips analógicos.

keley, se comenzó a considerar una aproximación “híbrida” en la que se empleaban componentes analógicos (incluidos transistores de mayor tamaño y contruidos de forma diferente<sup>87</sup>) combinándolos con transistores digitales usados como conmutadores. Nació así la técnica de “condensadores conmutados” (conocida como SC), que permitió la construcción de chips analógicos de bastante complejidad para tareas de filtrado y, sobre todo, de conversión analógico-a-digital (conversión A/D) y de digital-a-analógico (conversión D/A), tareas estas últimas claves para poder tener una verdadera interacción entre los dos mundos de la Electrónica, el digital y el analógico.

Otro punto importante era la extensión de estas ideas a frecuencias altas. El extenso uso del espectro en comunicaciones civiles y militares había llevado desde mitad del siglo XX a asignar rangos específicos de frecuencia a diferentes aplicaciones. La Figura 14 refleja la situación actual de esta distribución, en ella se indica el uso de las diferentes bandas, su frecuencia y su correspondiente longitud de onda.

**FIGURA 11**  
**DISTRIBUCIÓN DE USO DE LAS DIFERENTES BANDAS DE FRECUENCIA**  
**EMPLEADAS HOY DÍA.**



87. El aspecto físico, esto es, su geometría es lo realmente diferente; la tecnología de fabricación en cambio es la misma.

De esta forma, la nueva telefonía no podía trabajar en las bandas comerciales de radio sino en frecuencias mucho más altas. Esto implicaba un reto mayor a los circuitos que debían formar parte de los elementos de recepción y transmisión, incluyendo además la complejidad de incluir un tipo de antena que fuera, a su vez, pequeña y eficiente.

En realidad, la evolución de la telefonía móvil es la historia de una evolución en el rango de frecuencias útiles para aumentar las capacidades y la velocidad de transmisión, manteniendo los niveles de potencia de emisión por debajo de medio watio. Para lograr esto, se hizo necesario avanzar en el desarrollo de circuitos analógicos de alta frecuencia en tecnologías MOS y CMOS compatibles con los circuitos digitales. Se han ido generando un conjunto de técnicas de diseño específicas para los circuitos integrados analógicos y, en paralelo, para sus componentes activos (transistores) y pasivos (resistencias, condensadores, bobinas, antenas).

Las técnicas SC permitieron avanzar en la realización de circuitos analógicos discretos, pero con capacidades limitadas en frecuencia, debido a que se basan en muestrear señales a un ritmo rápido<sup>88</sup>. Esto determina que la señal de muestreo condiciona la velocidad máxima de operación y relega a estos circuitos a señales con un límite de frecuencia que sólo alcanza las decenas de MHz, lejos de las que se necesitan para procesar las señales de radio que se emplean en la telefonía móvil<sup>89</sup>.

A comienzos de los años noventa, comenzó a cristalizar un gran esfuerzo investigador en diferentes centros entre los que cabe destacar la Universidad Católica de Leuven, en Bélgica, o el CSEM, en Suiza. Versiones verdaderamente analógicas de los diferentes subsistemas que se precisan para convertir las señales de radiofrecuencia y la información que portan fueron generándose de manera muy eficiente. Amplificadores lineales, osciladores y, sobre todo, convertidores A/D y D/A han ido apareciendo, dando soporte a los terminales móviles que todos venimos usando tan profusamente.

Esto ha permitido un abaratamiento y una reducción en tamaño, peso y prestaciones que han convertido a estos teléfonos en auténticos terminales móviles. El hecho de poder ir incorporando mayor inteligencia a partir de la introducción de chips de microprocesadores, que podían coexistir con los componentes analógicos de alta y media frecuencia, ha posibilitado extender sus funcionalidades.

La infraestructura necesaria para que funcionara la primera generación comercial (G1) estuvo disponible a partir de comienzos de los años ochenta del siglo pasado<sup>90</sup>. Coexistieron inicialmente dos generaciones, 1G y 2G<sup>91</sup>, con precios elevados y presta-

---

88. En realidad, este tipo de circuitos procesa una versión discretizada en tiempo y cuantizada en valor de las señales analógicas que se manejan. Para que la emulación que hacen del procesado continuo sea bastante precisa es necesario que se tome un número suficiente de muestras en cada período de un reloj maestro.

89. Las bandas de frecuencia que se han ido utilizando en las distintas generaciones de telefonía móvil van de 900 MHz a 5 GHz.

90. El primer país con una infraestructura de antenas terrestres adecuada fue Japón, en 1979; le siguieron los países nórdicos de Europa (1981).

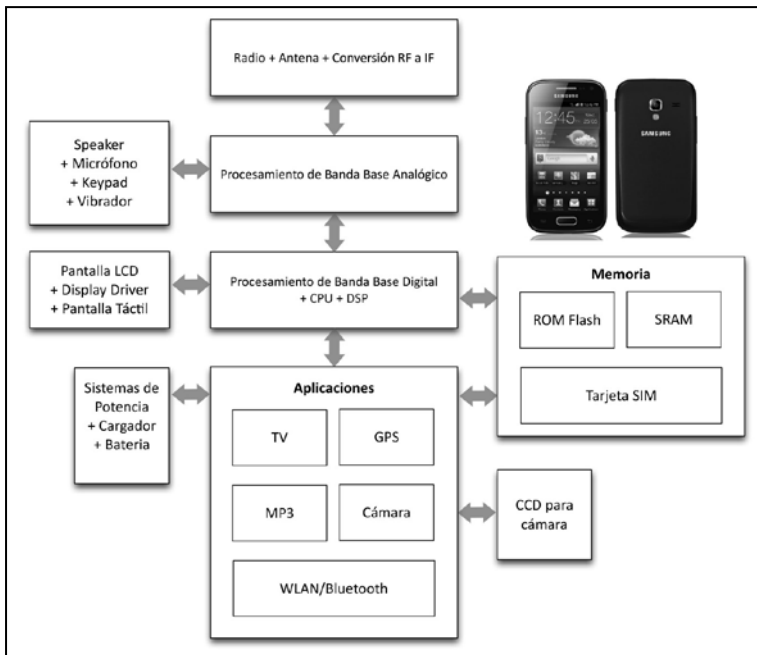
91. La principal diferencia entre ambos tipos residía en que 1G empleaba una modulación analógica de las señales a transmitir mientras que 2G empleaba modulación digital. El sistema 1G transmitía



ciones reducidas –si las comparamos con las que están disponibles en la actualidad–<sup>92</sup>. Estos antecesores sólo permitían la comunicación de audio entre dos terminales. A partir de 2001 estuvo disponible la tercera generación, 3G, que ya da soporte a auténticas plataformas multimedia que incluyen voz, correo electrónico, explorador de internet, videojuegos, GPS, etc. Esta nueva generación tiene un mayor ancho de banda que permite mayores velocidades de descarga. Mejores prestaciones se consiguen con la tecnología 4G actual y, por supuesto, con la recientemente introducida –la 5G–.

Como cabe esperar, la enorme ampliación de prestaciones que estas nuevas generaciones introducen requieren una electrónica mucho más sofisticada. Ha sido necesario incluir mejoras importantes de prestaciones y de volumen para poder aprovechar los nuevos rangos de frecuencia en que los teléfonos pueden operar. Podemos hacernos una idea del grado de complejidad que un teléfono móvil tiene observando la Figura 15, en la que se detallan sus componentes más importantes.

**FIGURA 12**  
**COMPONENTES DE UN TERMINAL TELEFÓNICO 3G/4G**



–y aún lo hace en muchos lugares donde todavía se emplea– en la banda de 900 MHz, mientras que el 2G lo hacía en la de 1,9 GHz. En cualquier caso, el proceso de modulación–demodulación exigía (y sigue exigiendo en las nuevas generaciones) un pre- y un post-procesado analógicos.

92. El primer teléfono patentado y comercializado fue el DynaTAC de Motorola. SU peso era de 790 g, medía 25 cm de longitud (sin contar la antena plegable), y se puso en el mercado con un precio de 4.000 dólares. Compárese con las dimensiones de un S5 de Samsung, por ejemplo, que pesa 145 g y mide 14 cm, fundamentalmente debido a su pantalla.

Podemos señalar en esa figura:

- *Antenas*: Normalmente incluyen diferentes antenas; una para las comunicaciones de radio (1,9 GHz), otra para el GPS (1,2–1,5 GHz), otra para BlueTooth (2,4 GHz) y finalmente una más para WiFi (2,4 ó 5 GHz).
- *Pantalla*: Es el principal interfaz del usuario con el teléfono. Actualmente la mayoría emplea cristales líquidos o LEDs en color. Precisa de un circuito que lo conecta con los otros subsistemas del teléfono y puede ser, en muchos casos, activado al tocar su superficie, como en una PDA.
- *Sensores–actuadores*: En esta categoría entran el micrófono, el altavoz, el teclado y el vibrador, todos ellos integrados en los teléfonos actuales. Se trata de transductores de sonido (micrófono) o presión (teclado) para convertirlo en electricidad o, en el caso del altavoz o el vibrador para convertir señales eléctricas en sonido o vibración. La propia pantalla actúa como sensor/actuador en muchos casos. A ellos se pueden agregar todo tipo de sensores en modelos más sofisticados
- *Subsistema de Radio*: Se trata de un conjunto de circuitos conectados a la antena o antenas; trabajan a frecuencias altas (GHz) y “preparan” las señales para ser decodificadas (cuando el teléfono está en fase de recepción) o transmitidas (cuando está en fase de transmisión). Es un proceso de modulación–demodulación relativamente similar a los usados en radio convencional cuyo objetivo es “bajar” la frecuencia de las señales que contienen la información (voz, audio, vídeo) para que el usuario las reciba; o “subir” la frecuencia de las señales que genera el usuario cuando se tienen que transmitir.
- *Subsistema de procesamiento Analógico*: Este circuito recibe las señales convertidas a una frecuencia media (la llamada técnicamente Frecuencia Intermedia ó IF) y las convierte a digital para interpretarlas; también es capaz de convertir señales digitales a analógicas para proceder a transmitir las a través del subsistema de radio. Asimismo, puede realizar tareas de compresión–descompresión y conecta con algunos interfaces como el altavoz o el micrófono, suministrando funciones de filtrado.
- *Subsistema Digital*: Funciona como el elemento de control y está formado por un microprocesador con su memoria propia y, muchas veces, cuenta con otro procesador que realiza tareas de procesamiento digital de señal.
- *Memoria*: la complejidad actual exige el empleo de diferentes formas de memoria integrada (SRAM, ROM), así como memorias externas (tipo *flash*) para aumentar la capacidad de almacenaje de fotos, vídeos, ficheros en general y, por supuesto, la información que identifica al usuario<sup>95</sup>.

---

93. GPS es el sistema de posicionamiento global basado en satélites; BlueTooth y WiFi son sistemas de comunicación e interconexión de computadores a corta distancia y sin cables.

94. PDA, de las siglas en inglés de asistente digital personal.

95. Esta información, que corresponde al PIN, está almacenada en la tarjeta SIM (Subscriber Identification Module) que proporciona el operador de telefonía.

- *Subsistema de Potencia*: Aparte la propia batería, incluye mecanismos para el control eficiente y el manejo de aquélla, usando circuitos para colocar al teléfono en modo “durmiente” cuando está inactivo o para “despertarlo” al recibir una llamada, logrando aumentar la vida de carga y extendiendo el tiempo entre una carga y otra.

Aparte de esto hay que considerar los componentes *software* que incluyen el sistema operativo y las múltiples aplicaciones que todos conocemos y usamos (*What'sApp* es un buen ejemplo).

Con este nivel de complejidad no cabe duda de que un teléfono móvil es uno de los objetos más elaborados que el hombre ha construido y, casi con seguridad, el que mayor número de componentes/aplicaciones contiene por unidad de volumen. El número de transistores que puede tener un terminal de última generación se mide en miles de millones, combinando tecnologías tan diversas como las que hemos puesto de manifiesto más arriba. A esto hay que añadir que el número de terminales en uso hace tiempo que superó los mil millones<sup>96</sup>, lo que refleja la importancia económica –además de la sofisticación tecnológica– que la Electrónica ha alcanzado. Y, por supuesto, todo ello ha conllevado un cambio drástico en las costumbres sociales y personales, un cambio con elementos muy positivos pero que combina otros altamente negativos como, por ejemplo, la excesiva dependencia del móvil que se ha convertido en elemento esencial del que muchas personas no son capaces de separarse.

Otra consecuencia interesante de estos avances en telefonía tiene que ver con el desarrollo de técnicas que han permitido ampliar el campo de la miniaturización incluyendo microsensores y microactuadores; para hacerlo, se han incorporado procedimientos de micromecanizado que complementan las tecnologías tradicionales de fabricación. Otra secuela de interés es considerar cómo las grandes aplicaciones tradicionales que han permitido el desarrollo de la Electrónica están convergiendo de manera que cada vez hay más funciones integradas en un dispositivo universal, *provisto de comunicación y cómputo*, además de otras funcionalidades que día a día se incluyen<sup>97</sup>.

Existen otras muchas aplicaciones que han ido evolucionando a lo largo del tiempo, pero nos hemos centrado en este artículo en las dos más paradigmáticas precisamente porque, como acabamos de comentar, convergen hacia un sistema electrónico único de carácter personal que facilita la comunicación ubicua, es decir, permanente con independencia de nuestra situación y circunstancias. Por otra parte, ambas aplicaciones configuran un enorme mercado a nivel global que mantiene un ritmo de crecimiento cuya saturación parece estar en un múltiplo del número de habitantes del planeta, con todo lo que ello significa de bueno y de malo, científica y socialmente hablando.

---

96. Se calcula que en el tercer trimestre de 2012 se sobrepasó esa cifra de mil millones de teléfonos móviles vendidos.

97. El ejemplo más claro es el iPad –en general, las tabletas– que integran comunicación y cómputo de una manera unificada.

Hasta ahora hemos hecho un resumen del cambio que ha significado la Electrónica digital con el uso masivo de la telefonía celular. Sin entrar en consideraciones referentes a los usos sociales ni al impacto que estos usos están teniendo sobre nuestras vidas, hay un hecho que apuntábamos en el que debemos detenernos aquí. Se trata de la convergencia de las dos grandes aplicaciones que han sido tradicionalmente el gran motor de la Electrónica: las comunicaciones y la computación. La oportunidad de tener acceso a la información sin ninguna restricción ha hecho aparecer conceptos tales como la “nube” o el almacenamiento distribuido, que requieren y se basan en terminales que puedan ser indistintamente nuestro PC o nuestro teléfono, añadiendo a cada uno de esos aparatos funcionalidades típicas del otro.

La idea de ubicuidad de nuestros datos se está convirtiendo en un elemento clave; queremos tener acceso a *cualquier* contenido, en *cualquier* lugar del mundo, desde *cualquier* dispositivo, en *cualquier* momento, para manejarlo de *cualquier* manera (verlo, escucharlo, imprimirlo, modificarlo, reenviarlo, procesarlo, en fin).

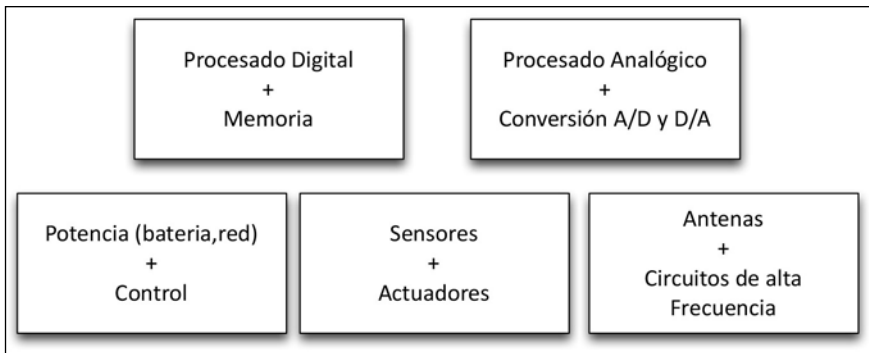
Sin duda, esta ansia por permanecer comunicado define la evolución futura de los sistemas electrónicos y condiciona el desarrollo de los circuitos y dispositivos que los integran. Por supuesto, la industria es muy consciente de ello y lo alienta, poniendo continuamente a nuestra disposición sistemas que proporcionan mejores prestaciones. Se trata de un enorme mercado que pretende superar en volumen el número de habitantes del planeta. Una de sus estrategias ha consistido en añadir funcionalidades vinculadas a campos muy diversos; un buen ejemplo es el de la monitorización de las variables corporales, que requiere el desarrollo de sensores compatibles con los circuitos microelectrónicos y tiene aplicaciones en medicina, pero también en el deporte. Estos sensores comenzaron a ser viables hace una veintena de años y han requerido de técnicas que pueden ser añadidas a los procesos de fabricación habituales en los chips.

Han nacido así tecnologías de microsensores químicos o físicos que están pensados para extender las capacidades de los terminales electrónicos que usamos ahora o en el futuro. Probablemente será difícil que el tamaño de nuestros teléfonos se reduzca, debido a las limitaciones relativas al tamaño de imagen que podemos manejar con comodidad y algo parecido ocurrirá con los ordenadores. Pero se piensa en la posibilidad de desarrollar otro tipo de terminales que no tengan esas limitaciones. Por ejemplo, las gafas que incorporan conexión a INTERNET o la píldora inteligente, un sistema electrónico capaz de dosificar la medicación en enfermos crónicos de manera autónoma, analizando in-situ las constantes del paciente. O, más a largo plazo, la introducción de sistemas implantables que eviten las limitaciones de tamaño actuales, utilizando directamente nuestros ojos y oídos como terminales de salida y nuestro cerebro como dispositivo de entrada.

Esta irrupción de dispositivos que complementan y amplían las funcionalidades del transistor están, a su vez, abriendo el abanico de utilidades que pueden incorporarse a estos terminales inteligentes que se han adueñado de nuestras vidas. Por supuesto, casi todos ellos precisan de una interacción previa que cae dentro del ámbito analógico y requiere de la conversión reversible entre ambos mundos –el analógico y el digital–. Aunque pueda resultar curioso, la evolución actual de las aplicaciones digitales ha lleva-

do a la cooperación necesaria entre el amplio universo digital, gobernado por la Ley de Moore, y el más reducido círculo analógico, que no entra dentro de ese marco predicho por Moore<sup>98</sup>. Algunos sistemas actuales –cada vez más– y la mayoría de los sistemas futuros conducen a estructuras muy complejas en las que cooperan elementos discretos y continuos. Así, la arquitectura que hoy se considera ya “típica” de estos sistemas avanzados es la de la Figura 16, en la que puede verse esa necesaria cooperación y en la que muchos lectores reconocerán equipos electrónicos que les son familiares: tabletas o teléfonos multimedia.

**FIGURA 13**  
**ESQUEMA DE UN TERMINAL INTELIGENTE ACTUAL**



El enorme auge de la fotografía y la videografía digitales (convergiendo también hacia un tipo de cámara que sirva a ambos propósitos) ha contribuido a este nuevo status quo. Téngase en cuenta que tales cámaras están basadas en el uso de sensores bidimensionales de gran tamaño que contienen millones de dispositivos no-digitales que deben transferir información a través de convertidores A/D para su procesamiento y almacenamiento. Y, por supuesto, estas cámaras cada vez más tienden a confundirse con los teléfonos móviles.

No obstante, desde la perspectiva de este trabajo, lo importante es que planteemos al lector qué puede dificultar esa evolución futura, sea cual sea. En otras palabras, que respondamos a preguntas tales como ¿continuará la evolución de la Microelectrónica al mismo ritmo que hasta ahora? ¿Se vislumbran nubarrones en el horizonte?

Como hemos descrito, la Electrónica se basó primero en un tipo de dispositivo representado por el triodo y basado en los fenómenos de paso de corriente eléctrica en vacío; dispositivo que luego fue desplazado por el transistor en cualquiera de sus formas y por el estudio de la conducción de corriente en sólidos, basada esencialmente en conceptos de difusión y arrastre. Hasta el momento presente, el paradigma representado por

98. Se ha acuñado el término “more tan Moore” (más que Moore) para designar a estos componentes que no están regidos por la Ley de Moore, haciendo un juego de palabras en inglés.

los transistores –bipolares o unipolares– ha continuado siendo esencial, pero se ha ido adaptando a las necesidades y requerimientos de los sistemas electrónicos impuestos por la industria. Esto hace que, en realidad, la cuestión clave a plantearse es: ¿hasta cuándo podrá evolucionar el transistor para seguir atendiendo a esas necesidades?, ¿existen límites a esta evolución?

Comenzaremos detallando los problemas que han ido surgiendo durante este lapso de tiempo en el que, en apariencia, todo ha ido sobre ruedas. Desde luego, nada más alejado de la realidad: problemas ha habido muchos. Y no todos están bien resueltos.

Hemos hablado mucho de la Ley de Moore, una ley empírica que ha sido capaz de predecir el ritmo de crecimiento en complejidad de los chips totalmente digitales. Visto desde otra perspectiva, que los dispositivos electrónicos (fundamentalmente los transistores) se han ido haciendo más pequeños de manera consistente. Aquí han residido, residen y (seguramente) residirán la mayoría de las dificultades para el cumplimiento futuro de la Ley de Moore.

El primer punto a tratar es cómo se consigue hacer transistores cada vez más pequeños; la respuesta está relacionada íntimamente con el procedimiento de fabricación, con la fotolitografía. En principio, basta con reducir las dimensiones de las máscaras que se emplean para “dibujar” patrones sobre el semiconductor. Pero eso impone un límite debido a la longitud de onda de la luz, que se difracta a partir de cierto valor. Para eliminar esa barrera se utilizan hoy día longitudes de onda más allá del visible<sup>99</sup>, por ejemplo; pero irán apareciendo barreras similares si seguimos reduciendo dimensiones. Por supuesto, aun así la precisión que se requiere hace difícil no pensar en limitaciones antes o después<sup>100</sup>.

Un problema más complejo surge de una relación de la que ya hemos hablado: las correlaciones entre tamaño, velocidad, densidad de potencia y fiabilidad. Según reducimos dimensiones las densidades de potencia aumentarían si no ponemos remedio<sup>101</sup>; una manera de mantener o incluso reducir esta densidad de potencia es bajar los voltajes de alimentación de los chips, pero eso reduce su velocidad de operación en forma proporcional. Por otra parte, la fiabilidad depende críticamente de la propia densidad de potencia, si ésta aumenta crece la tasa de fallos de los chips. Todo eso sin entrar a detallar otros problemas relacionados e igualmente importantes tales como el rango dinámico, la tensión de umbral, la ruptura del óxido en el canal, etc. Actualmente se emplean estrategias complejas a nivel de sistema, encendiendo y apagando selectivamente las componentes que intervienen en un proceso determinado. Eso complica el diseño integral

---

99. Se utilizan longitudes de onda que corresponden al ultravioleta y al llamado ultravioleta extremo.

100. Para hacernos una idea de esto, cabe señalar que los requerimientos de resolución de impresión sobre silicio para transistores en una tecnología de 70 nm equivalen a la necesaria para dibujar una moneda de 10 céntimos, situada sobre la superficie terrestre, desde la distancia a la que vuela un transbordador espacial.

101. La densidad de potencia viene dada por el producto voltaje por corriente dividido por la superficie. Si la tensión aplicada y la corriente que circula siguen siendo las mismas, al reducir la superficie del transistor a la mitad aumentaremos la densidad de potencia al doble.

de hardware y software y aumenta la propia complejidad de los sistemas al tener que introducir circuitería adicional para llevar a cabo esa funcionalidad.

Desde un punto de vista físico, el escalado del transistor a dimensiones más pequeñas ha necesitado del establecimiento de ciertas metodologías, ya que no todas las variables implicadas se escalan siguiendo una misma ley. Por ejemplo, el espesor del óxido de silicio que se suele emplear para aislar los terminales de un transistor MOS es muy sensible a la reducción de dimensiones, ya que el campo electrostático que lo atraviesa puede llegar a hacerse tan intenso que el dieléctrico se perfora y el transistor se destruya provocando un enorme calentamiento en todo el sistema.

Igualmente, la reducción de dimensiones plantea problemas que se hacen más difíciles según se avanza por ese camino. Estos problemas pueden agruparse en cuatro categorías: a) los derivados de las técnicas de fabricación (básicamente de la litografía), b) los causados por los materiales empleados (el problema referido del óxido de silicio, entre otros), c) los que son inherentes a la estructura física del transistor (entre ellos, la creciente influencia de efectos cuánticos y la dificultad de su modelado eléctrico), y d) los debidos al aumento de tamaño de los chips para incluir en ellos mayor “inteligencia” (disipación de potencia, por ejemplo).

No es nuestro objetivo entrar en los detalles técnicos de cada uno de estos puntos, pero sí debemos mencionar que la traducción práctica de todas esas dificultades lleva a la paradoja de necesitar sistemas más complejos de tamaño reducido pero con un coste igual o menor y con unas capacidades cada vez mayores. Simplificando, todo se reduce a producir transistores más pequeños y con mejores prestaciones pese a los problemas físicos y químicos que eso impone.

Desde hace una década, debido a esta reducción de dimensiones, puede decirse que la nanotecnología<sup>102</sup> ha ido ganando importancia en la evolución del transistor. Sin profundizar demasiado, se trata de aprovechar nuevos fenómenos, propiedades y funcionalidades que son propias del dominio nanométrico. Esto está permitiendo el uso de materiales alternativos tanto para la parte semiconductor como, sobre todo, para los aislantes; el empleo de nuevos mecanismos de transporte de carga que ayudan, complementan o sustituyen a los que han sido tradicionales en los transistores hasta ahora y, fundamentalmente, la introducción de nuevos procedimientos no-planares<sup>103</sup> para construir estos dispositivos.

Transistores con unas dimensiones mínimas por debajo de los 100 nm (nanómetros) están en el mercado desde hace más de una década. Esto se corresponde con la que podríamos llamar Ley inversa de Moore, que predice que el “tamaño lineal” de los tran-

---

102. Se trata de un conjunto muy diverso de propiedades de los materiales que se deben a la estructura de complejos moleculares en el rango que va de 1 a 100 nanómetros. Un nanómetro es la millonésima parte de 1 milímetro.

103. Los dispositivos electrónicos han sido tradicionalmente planares, esto es, pueden considerarse como de dos dimensiones ya que su espesor es despreciable y los mecanismos de conducción son superficiales. Un dispositivo es no-planar cuando deja de ser válida esa aproximación y debe considerarse tridimensional.

sistores se ha venido reduciendo en un factor de 0,7 cada dos años<sup>104</sup>. De hecho, hoy día tenemos transistores en los laboratorios de investigación por debajo de los 10 nm. Estos dispositivos avanzados se construyen combinando nuevos conceptos de fabricación, nuevos materiales y nuevas estructuras para el transistor, así como ideas a nivel de sistema que permiten mejorar el rendimiento global<sup>105</sup>.

Ciñéndonos al transistor, el primer punto a tener en cuenta es que, en estos dispositivos nanométricos, los mecanismos de conducción han dejado de ser esencialmente los tradicionales de arrastre y difusión, para combinarlos con otros de tipo hidrodinámico e incluso cuántico. Esto modifica –y complica– significativamente los modelos eléctricos que se emplean para diseñar circuitos con estos componentes<sup>106</sup>. Por otra parte, las propiedades físico–químicas de los nuevos materiales que se utilizan no son equivalentes en todo a los materiales usados tradicionalmente<sup>107</sup>. A ello hay que añadir que las dimensiones en que nos movemos se van aproximando a las atómicas, lo que conlleva dificultades añadidas<sup>108</sup>, por ejemplo, inhomogeneidad de las capas superficiales. Finalmente, al crecer la complejidad de las nuevas generaciones de chips, crecen también de manera significativa los problemas derivados del aumento de temperatura en el circuito<sup>109</sup>.

Con este panorama es lógico que se esté planteando encontrar un sustituto al transistor MOS que no presente los inconvenientes de los que estamos hablando. Sin embargo, pese a la importancia del tema y a los recursos que se han puesto en juego, en el momento actual no existe consenso sobre cuál puede ser la estrategia adecuada para afrontar el futuro de la Electrónica. Existen, para ello, dos dificultades principales. La primera es

---

104. En realidad esto no es sino otra manera de interpretar la Ley de Moore, ya que para conseguir el aumento de complejidad que ésta predice, los transistores han ido reduciendo sus dimensiones proporcionalmente.

105. Por ejemplo, se utilizan velocidades de reloj diferentes dentro del chip, se aumenta o disminuye el voltaje de alimentación de manera dinámica, se emplean técnicas digitales asíncronas, etc.

106. Aparte de ello, hay que tener en cuenta efectos no deseados tales como las fugas de corriente por efecto túnel a través del óxido de puerta incluso en estado de no conducción o la variabilidad de la tensión umbral del transistor.

107. Las tensiones mecánicas en los nuevos dieléctricos o su comportamiento frente a impurezas no guardan relación con los del óxido de silicio, lo que precisa de estrategias de fabricación diferentes.

108. Para hacernos una idea, en un transistor con una longitud de canal de 30 nm, el espesor del dieléctrico necesario para aislar el terminal de puerta es de 3,5 nm. Esto significa que el canal está formado por 78 columnas de átomos de silicio y el aislante equivale a 13 capas de átomos, lo que da una idea de la precisión que se requiere para fabricar este dispositivo, ya que es muy difícil conseguir una distribución de impurezas homogénea con estas dimensiones y aparecen, además, un alto número de defectos cristalinos. Más aún, los campos eléctricos son aplicados sobre espesores inferiores a los 10 nm, lo que implica valores enormes que pueden provocar la rotura del dieléctrico por efecto avalancha. A esto se une el decrecimiento de la movilidad de los portadores (electrones y huecos) debido al acortamiento del canal.

109. La densidad de potencia disipada se acerca a los 100 vatios por cm<sup>2</sup>, similar a la de un reactor nuclear, por ejemplo. Por otra parte, al existir fugas de corriente, la disipación estática –prácticamente nula en los circuitos CMOS convencionales– tiende a ser comparable a los valores dinámicos, lo que aumenta los valores de energía que se manejan. A esto hay que unir el hecho de que, al subir la temperatura, la tasa de fallos crece rápidamente.

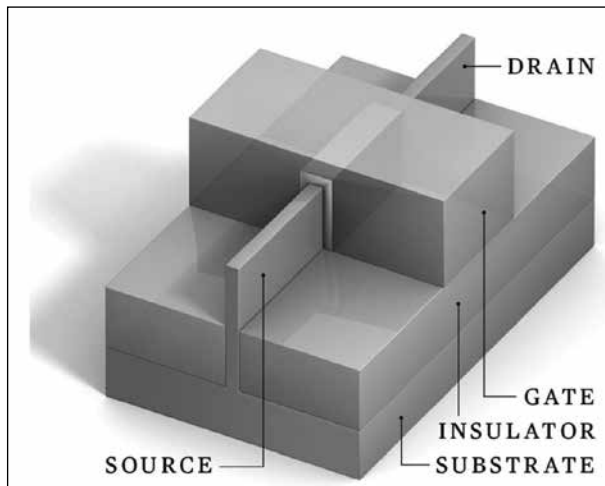


de carácter tecnológico: el sustituto del transistor deberá tener, cuando menos, las dos propiedades que se han demostrado esenciales tanto en la época de las válvulas como en la del transistor, es decir, tener la capacidad de amplificar y poder presentar dos estados lógicos estables; en esencia, deberá permitir la operación en los ámbitos analógico y digital. La segunda dificultad es de orden práctico: la industria electrónica ha realizado enormes inversiones para mantener un ritmo creciente de producción y, por tanto, pretende continuar aprovechando sus infraestructuras todo lo posible.

Combinando estos dos puntos, no es de extrañar que se esté apoyando sobre todo la línea continuista –o evolucionista– que pretende seguir investigando en mejoras del propio transistor como solución a corto y medio plazo. En este sentido, la aplicación de la Nanociencia a los dispositivos electrónicos lleva explorándose desde hace más de una década y está dando excelentes logros. Así se han desarrollado transistores en el rango de 10 a 30 nanómetros basados en el uso de materiales semiconductores avanzados (de alta conductividad como germanio o compuestos de semiconductores III/V)<sup>110</sup> y de dieléctricos alternativos, en la construcción de transistores no planares (por ejemplo, verticales o de aleta y multi–puerta) para permitir menores dimensiones manteniendo, en lo esencial, las propiedades de los transistores.

La Figura 14 muestra una nueva estructura de transistor, el MOS vertical. Aquí los problemas de espesor del material aislante se solventan empleando un doble terminal de acceso a la puerta y un canal en posición vertical.

FIGURA 14



110. Esto hace referencia a materiales como el arseniuro de galio o el fosfuro de indio, cuyos componentes aparecen, respectivamente, en las columnas III y V de la Tabla Periódica de los elementos químicos; el compuesto resultante presenta propiedades semiconductoras.

Una línea de progreso en este sentido, también relacionada con la nanotecnología, es la sustitución del canal en los transistores por nanotubos (o incluso nanohilos) de carbono; estos nanotubos pueden presentar propiedades metálicas o semiconductoras, permitiendo densidades de corriente muy altas y exhibiendo unas movilidades muy altas tanto de electrones como de huecos. Sus dimensiones reducidas y sus propiedades eléctricas les hacen muy interesantes. En este momento se trabaja en construir transistores verticales con nano hilos y dimensiones de canal inferiores a los 7 nanómetros.

Modificaciones más arriesgadas, como el empleo de nano hilos en estructuras verticales similares y el uso del efecto túnel (un efecto cuántico) para mejorar las propiedades de conducción; o la utilización de un canal de grafeno<sup>111</sup> que permita regular electrostáticamente la anchura de la banda de energía prohibida entre las de conducción y valencia, son ejemplos interesantes. En este sentido, el propio grafeno ha permitido otros dispositivos más exóticos como, por ejemplo, el uso de una bi-capa de ese material para dar lugar, en la puerta, a un condensado de Bose-Einstein que permite construir un transistor cuyos mecanismos de conducción aprovechan conceptos de spin.

Lo que demuestran estas variantes del MOS es que se ha abierto la puerta a considerar otros efectos más allá de los puramente electromagnéticos como soporte de nuevos dispositivos electrónicos. Este camino es el que podemos llamar revolucionario, ya que abandona la idea tradicional de transistor y busca un sucesor sin limitarse a las estructuras y técnicas tradicionales. Aquí es donde surgen las innovaciones más arriesgadas; la Figura 17 resume un esquema de los caminos bajo exploración en este momento. Como puede verse, hay una serie de dispositivos que pueden considerarse de estado sólido aunque abandonen el paradigma tradicional; estos dispositivos, que ocupan la parte izquierda del cuadro, se estructuran en aquellos que mantienen –en lo esencial– los mecanismos de transporte tradicionales (nano-CMOS, o CNFET)<sup>112</sup>, y en los que se basan en fenómenos cuánticos como complementarios o sustitutivos de tales mecanismos. Por ejemplo, transistores de spin, puntos cuánticos, diodos de transferencia resonante (RTD), o transistores de electrón único (SET)<sup>113</sup>. En este marco es difícil separar la evolución de la Electrónica de la de la Fotónica, ya que muchos de estos nuevos componentes pueden considerarse tanto dentro de una de estas ciencias como de la otra.

En un estado menos avanzado y estructurado tenemos que mencionar a aquellos nuevos dispositivos que aspiran a sustituir al transistor empleando conceptos completamente diferenciados, tales como la electrónica molecular, la electro-química, la biología (sobre todo la imitación del ADN) u otras ideas basadas en fenómenos electromecánicos o cuánticos<sup>114</sup>.

---

111. El grafeno es un alótropo del carbono que se presenta en forma de un retículo hexagonal bidimensional. En 2010, Andre Geim y Konstantin Novoselov de la Universidad de Manchester, fueron galardonados con el Nobel de Física por sus experimentos con este material. Otros alótropos del carbono son el grafito, el diamante, el fulereno y el carbino.

112. CNFET, de las siglas en inglés de transistor de efecto campo basado en nanotubo de carbono.

113. RTD corresponde a Resonance-Transfer Diode y SET a Single-Electron Transistor. Hemos traducido además Quantum Dots por Puntos Cuánticos.

114. Nos referimos aquí a conceptos cuánticos no relacionados con componentes similares o análogos a los transistores clásicos, como aquellos que hemos incluido entre los de estado sólido; por

En este bosque de alternativas es imposible decantarse todavía por un claro vencedor. Cada uno de estos nuevos dispositivos presenta ventajas interesantes e inconvenientes difíciles de salvar. Algunos prometen densidades muy altas y otros, velocidades de operación enormes o una muy pequeña energía de conmutación. Sin embargo, cuando se hace una comparación de los parámetros que la industria considera importantes para plantearse explorar uno de estos dispositivos, los resultados son descorazonadores. Teniendo en cuenta tales parámetros, entre los que se encuentran:

1. La compatibilidad con los sistemas electrónicos convencionales.
2. La estabilidad y fiabilidad.
3. La temperatura a la que operan<sup>115</sup>.
4. La eficiencia energética que ofertan.
5. La sensibilidad a cambios ambientales.
6. La escalabilidad.

FIGURA 16

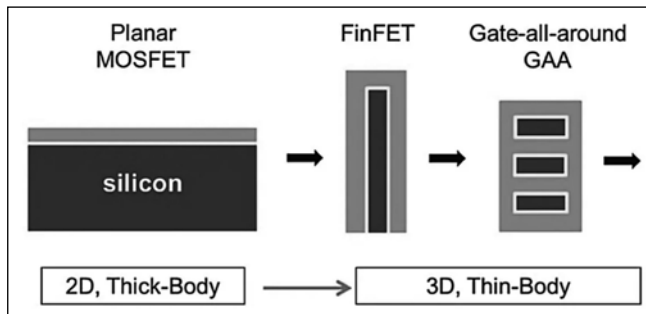
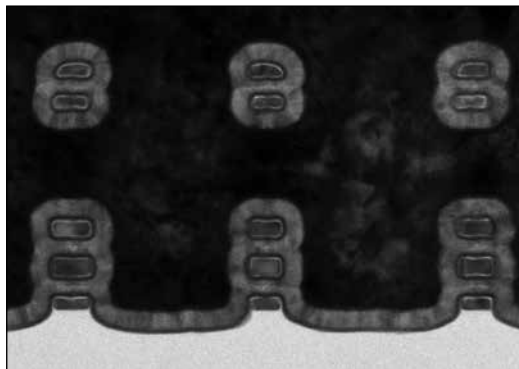


FIGURA 17



ejemplo, la llamada RSFQ (de Single Flux Quantum Logic ó lógica cuántica de flujo simple rápido) o los autómatas cuánticos celulares (QCA)

115. Algunos de estos nuevos dispositivos requieren temperaturas muy bajas.

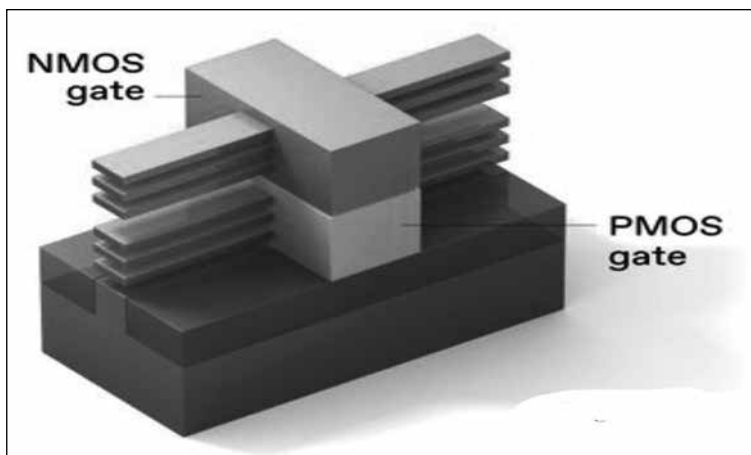
Las estructuras mejor posicionadas son aquellas que se basan en modificar el MOS, tal como dijimos anteriormente, empleando elementos unidimensionales tales como nanotubos o nanohilos, situándose las restantes (todavía) en posiciones alejadas.

En un número reciente (Diciembre de 2022) de la revista Spectrum del IEEE, todos los expertos entrevistados coincidían en la vigencia del transistor (con las modificaciones necesarias) a largo término. Puede compararse la historia de este dispositivo como la subida sucesiva de varias montañas tecnológicas. Cada vez que se corona una cima se vislumbra otra más alta en apariencia. Pero, hasta ahora la colaboración entre la industria y la academia ha sido capaz de escalarlas todas. Por supuesto, se prepara la escalada a las que se perfilan en el horizonte, con la confianza del éxito conseguido hasta ahora.

Hoy día, el transistor MOS ha evolucionado desde su estructura plana, en dos dimensiones, a arquitecturas tridimensionales, como puede verse en el esquema de la Figura 16, esto es, de una puerta horizontal a una puerta vertical o incluso a un conjunto de puertas embebidas o rodeando el cuerpo del semiconductor de soporte.

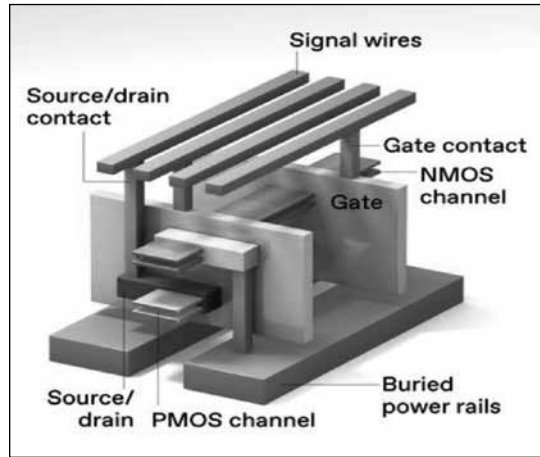
Un ejemplo de la resiliencia del transistor son las nuevas estructuras tridimensionales, como la estructura CMOS cuya microfotografía aparece en la Figura 17 (microfotografía) y Figura 18, que ilustran la disposición de esos nuevos transistores tridimensionales. Este nuevo tipo de transistores se construye usando un procedimiento de auto alineado, que permite construir a la vez los dos transistores que configuran una estructura tipo CMOS, (ver Figura 19 , más abajo).

FIGURA 18



En este caso, la puerta del transistor P está hecha de un metal diferente a la del transistor N. Por supuesto, la conectividad de este tipo de estructuras se complica, a su vez. En la siguiente Figura 19 podemos observar su complejidad en un circuito muy simple (un inversor CMOS, como ya hemos indicado).

FIGURA 19



Afortunadamente la investigación en estructuras de conexionado en tres dimensiones ha evolucionado mucho en los últimos tiempos hasta incorporarse a las técnicas avanzadas de montaje de sistemas complejos en uso en la industria microelectrónica.

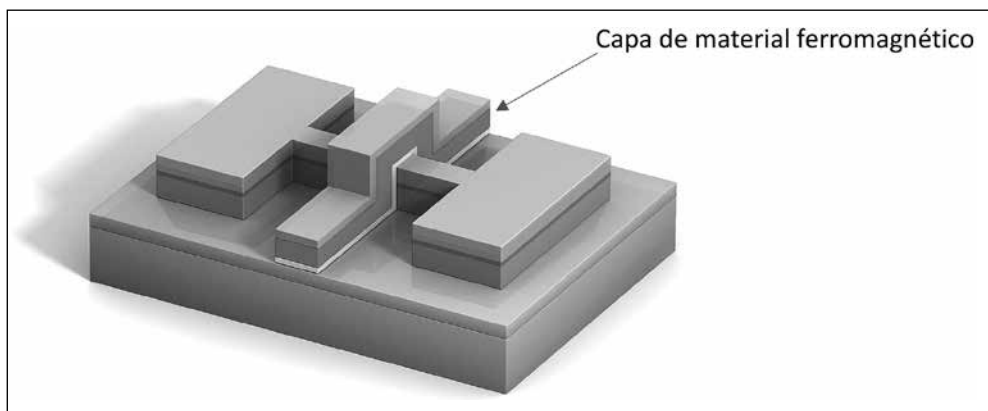
Para complicar más la pintura, no debemos olvidar que la Electrónica actual ya no puede considerarse como un dominio exclusivamente digital. El empleo de micro y nano sensores y actuadores conlleva sustituir –o hacer compatibles– estos componentes periféricos con los de procesamiento, cosa que los transistores actuales saben hacer. A ello hay que añadir que el manejo de las señales que generan los sensores o aceptan los actuadores son esencialmente analógicas, lo que requiere transistores capaces de tratarlas. Sensores/actuadores mecánicos, térmicos, electromagnéticos, químicos u ópticos se unen a interfaces bio-electrónicas o a microespejos conforman una mayor diversificación e imponen a esos componentes que se pretende encontrar unos requerimientos y restricciones todavía mayores.

Puestos a imaginar el future, Podemos pensar que, a varias décadas vista, el transistor podrá ser fabricado como una simple molécula– Este bloque prefabricado podrá ser colocado en su lugar preciso de un chip por un proceso llamado autoensamblaje dirigido (DSA, de las siglas en inglés de directed–self–assembly ). Para entender cómo funciona el DSA, podemos señalar que el virus del COVID usa sus “pinchos” para encontrar y fijarse químicamente en una posición precisa sobre la superficie de una célula humana. En un proceso DSA, los puntos de anclaje, los “pinchos” y el propio transistor han de ser cuidadosamente fabricados. Así, los puntos de anclaje pueden ser creados usando litografía sobre un sustrato. “Pinchos” adicionales podrían crearse para ayudar al proceso en sus diferentes pasos. Finalmente, los que no resultaran útiles, una vez colocado el transistor en su sitio, podrían ser eliminados por calentamiento o por otros medios físicos.

Pero, aparte de hacer transistores pequeños, debemos continuar reduciendo su factura energética. Una opción en este sentido, son los recientemente introducidos

transistores de efecto campo de capacidad negativa (NCFET, de las siglas en inglés de negative-capacitance field-effect transistors). Estos dispositivos requieren la inserción de una capa de espesor nanométrico de material ferroeléctrico (por ejemplo, óxido de circonio-hafnio) como parte de la pila del transistor vertical o, entre la capa de puerta y el canal, en los transistores de aleta. Esta nanocapa contiene su propio campo eléctrico interno lo que permite al transistor usar menos energía para conmutar entre sus dos estados, 0 y 1. Adicionalmente, es posible usar la capacidad generada por la capa ferroeléctrica como un condensador donde almacenar un bit, permitiendo así integrar capacidad de memoria y de cálculo en el mismo elemento de circuito.

FIGURA 20



La Figura 20 muestra la estructura de este dispositivo en un transistor de aleta (FinFET). Esta idea ha sido probada y reportada recientemente y una industria, Global Foundries, ha realizado con éxito una primera estructura en una tecnología comercial de 14 nm. Puede apreciarse en la Figura20 la capa de material ferromagnético que subyace bajo la gate primaria del dispositivo.

¿Qué significa todo esto? Podemos llegar a varias conclusiones generales. En primer lugar, que la Electrónica ha evolucionado en algo más de cien años hasta trascender su papel como ciencia y tecnología y convertirse en una seña de identidad del momento histórico presente, condicionando incluso nuestros modos de vida y nuestras costumbres. Esto lo ha conseguido en base a proporcionarnos una extraordinaria capacidad de comunicación y unas enormes posibilidades de cómputo, todo ello puesto al alcance de nuestra mano en forma de terminales muy accesibles y manejables.

Pero esto ha tenido efectos de otra índole. Dejando aparte, por no estar en el foco de este artículo, el impacto social y la carencia de estrategias para asimilarlo, hay una consecuencia importante derivada de continuar manteniendo el nivel de crecimiento del sector electrónico; se trata de la necesidad de atender a nuevos ámbitos que precisan componentes que sustituyan al que ha sido el caballo de batalla a lo largo de los últimos

setenta años, al transistor. No olvidemos las premisas que parecen sustentar al dispositivo ideal que seguiremos precisando, esto es, amplificación y capacidad binaria estable. Esta sustitución se presenta, pues, complicada y, de momento, no es posible imaginar en qué dirección nos moveremos cuando, si las predicciones actuales se cumplen, entremos en la próxima década y el MOS sea incapaz de proveer las prestaciones que se le demanden.

¿Se detendrá, por eso, el avance de esta ciencia? Es arduo pensar que sea así, posiblemente habremos encontrado alternativas viables. En cualquier caso, se habrán abierto caminos nuevos en cuya exploración el ingenio humano habrá continuado con la tarea de plantearse preguntas, resolver enigmas, construir paradigmas nuevos e innovar.

Pero, en cualquier caso, hay otros problemas a considerar, de índole muy distinta, relacionados con el uso extensivo de los componentes electrónicos. El principal está íntimamente ligado al consumo de energía. Es cierto que, los transistores actuales disipan muy poca energía; pero hemos visto que los sistemas incorporan miles de millones de esos dispositivos. Y, a su vez, el número de usuarios de las tecnologías que se basan en los transistores tiende a ser el de habitantes del planeta. Por tanto, hablamos de que el número de sistemas en funcionamiento es del orden de los millares de millón. Este doble efecto multiplicativo, lleva a concluir que, en un futuro próximo tendremos que extremar la prudencia al usar las TIC. Salvo que los nuevos “transistores” sean capaces de trabajar eficientemente en un rango de energía aún menor que los actuales. A este condicionante se le ha prestado poca atención hasta ahora. Pero, vamos a intentar cuantizar lo que puede significar.

Primero hemos de considerar los principales componentes de la factura energética que demanda la industria de chips. Estos pueden resumirse en:

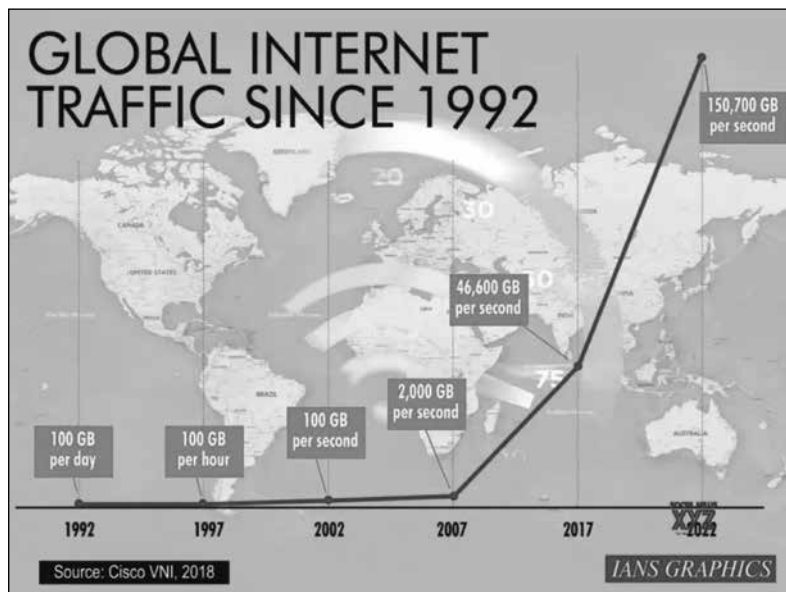
1. Fabricación y diseño de Chips. Considerando todos los gastos adicionales como ensamblaje, transporte, verificación, etc.
2. Uso comercial y personal de Aplicaciones, Especialmente aquellas muy Demandantes de Energía (GPS, video, etc.).
3. Aplicaciones futuras de gran demanda: IoT (Internet of Things), IoE (Internet of Everything), Conducción autónoma de automóviles, Generación de Criptomonedas y NFTs (Non Fungible Tokens), por ejemplo.
4. Infraestructuras de soporte a las comunicaciones e Internet (torres de telefonía, centros de datos).

Respecto al primer punto, según datos suministrados por TSMC (uno de las gigantes taiwaneses de la producción de chips, el mayor fabricante mundial), las aproximadamente 470 factorías consumen un total de 17 Tw-h/año.

Respecto al uso de aplicaciones es difícil hacer una estimación precisa. Pero el número de terminales activos y las proyecciones sobre su crecimiento nos permiten hacer una consideración cualitativamente importante. *En el mundo hay 5,28 mil millones de teléfonos móviles con un consumo anual de 21,4 TW-h/año (terminales + infraestructura). Esto es el consumo “estático” (carga periódica del terminal y conexión a la red).* A

eso hay que añadir el tráfico, sobre todo el de vídeo cuyos valores totales y evolución pueden verse en la Figura siguiente. Pero no se termina aquí: debido al uso indistinto de computadores para cálculo y comunicación, hay que tener en cuenta el uso y tráfico de los 2,1 mil millones de PCs y equipos portátiles existentes.

FIGURA 21



A largo plazo, el SIA (la asociación de Fabricantes de Semiconductores, *Semiconductor Industry Association*) calcula que, si seguimos al ritmo actual en el desarrollo de chips, “las TIC no serán sostenibles en 2040, cuando la energía necesaria para esa industria y las aplicaciones relacionadas excederán la producción mundial estimada de energía “.

Y no hemos considerado otras fuentes de despido energético, como las criptomonedas. En efecto, el procedimiento de producción de ese dinero virtual requiere en la mayoría de las más de 21.000 criptomonedas existentes el uso intensivo de computadores asociados en forma de granjas y distribuidos por todo el planeta. Según el Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index el máximo anual estimado es de 121,51 Tw-h sólo para el Bitcoin.

El conjunto de todos estos factores muestra un escenario desolador. La tecnología de comunicaciones ha entrado con fuerza en nuestras vidas y, desde una perspectiva técnica tiene una larga vida por delante. Pero su uso indiscriminado puede llegar a tener más impacto negativo que cualquier otro sector de la industria en un futuro cercano.

Estas pinceladas descritas nos llevan a concluir que nuestra vida actual está marcada por el devenir de unos elementos microscópicos que son los ladrillos con los que



se construye el complejo edificio de las tecnologías avanzadas que han irrumpido en nuestra sociedad. Esta evolución implica cambios en nuestro modo de comportarnos y, en particular, va a requerir de unas políticas de uso más disciplinadas, especialmente en su vertiente energética ya que, aunque los componentes básicos, los transistores disipen una energía insignificante, su agregación en números millonarios y la proliferación igualmente millonaria de sistemas hace necesario un uso racional y responsable, bastante mejor del que tenemos en estos momentos. Por supuesto, eso no significa eliminar estas tecnologías sino desarrollar métodos de uso racionales que vayan más allá del mero consumismo ciego y feroz

## **REFERENCIAS**

1. G. HUERTAS, J.L.HUERTAS, L. HUERTAS: “Del electrón al Chip”. Editorial Catarata–CSIC, 2015, ISBN: 978-84-9097-069-0.
2. SIA: 2021 State of the US Semiconductor Industry, 27 pp, 2022.
3. SIA 2022 State of the US Semiconductor Industry, 32 pág., Nov. 2022.
4. Cisco Annual Internet Report (2018-2023) White Paper, 35 pág., 2020.
5. Intel Annual report pursuant to Section 13 and 15(d), 134 pág, Enero 2023.
6. H. GOLDSTEIN: The Device That Changed Everything: Transistors are civilization’s invisible infrastructure, IEEE Spectrum, special issue, Dec. 2022.
7. M. RIORDAN: “How Europe Missed The Transistor”, IEEE Spectrum, special issue, Dec. 2022
8. M. RIORDAN LILLIAN HODDESON: “Crystal Fire: The Birth of the Information Age”. Ed. Norton, 352 pág., 1997, ISBN 978-03-9304-124-8.
9. A. VAN DORMAEL: “The ‘French’ Transistor,” *Proceedings of the 2004 IEEE Conference on the History of Electronics*, Bletchley Park, England, June 2004.
10. CH HU: The Future of the Transistor Is Our Future - Nothing but better devices can tackle humanity’s growing challenges. IEEE Spectrum, special issue, Dec. 2022.
11. B. LOJEK: “History of Semiconductor Engineering”, Springer Verlag 2007, pág 387, ISBN: 13 978-3-540-34257-1.
12. J.D. CRESSLER: “SILICON EARTH Introduction to the Microelectronics and Nanotechnology Revolution”, Cambridge University Press, 2009, ISBN 978-0-521-87939-2, 595 pág.
13. B. GILBERT: Electronics in Transition: The Tools and Technologies for 2000 AD pp 611-634, IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), May 1994.
14. “Cambridge Bitcoin Electricity Consumption: Index”: <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci>, 2022.



## **APERTURA DEL CURSO 2022-2023**

*Discurso pronunciado por el  
Excmo. Sr. D. José Luis de Justo Alpañés,  
presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias,  
en el acto celebrado en la Facultad de Física  
el día 12 de diciembre de 2022*

Ilmo. Sr. Decano de la Facultad de Física, queridos compañeros:

Tengo que decir, en primer lugar, que agradezco la total disponibilidad del Decano y el Vicedecano de Infraestructuras de la Facultad de Física para celebrar este acto presencial en su sede, y añadir que la primera apertura de curso de la Real Academia Sevillana de Ciencias se celebró en esta facultad para el curso 2004-2005.

El Sr. Secretario ha dado cumplida cuenta de las actividades de nuestra Academia durante el curso 2021-2022. Se puede decir que el año 2021, como en la Universidad de Sevilla y en toda España, ha venido marcado todavía por la pandemia. Me toca a mí destacar de forma breve aquellas actividades más importantes y esbozar las nuevas actividades para el curso 2022-2023.

Tras pasar la fase negativa en la que no pudimos convocar los Premios para Investigadores Jóvenes (2020 y 2021), debido a la eclosión de la pandemia, en la primavera de 2022 hemos podido celebrar la entrega de los premios de 2019, con la misma brillantez de siempre, y ya en el curso 2022-2023, otorgar los premios del año 2022.

Durante el año 2020, se impartieron dos de las conferencias de los académicos galardonados con los Premios para Jóvenes Investigadores de la convocatoria de 2018, pero hubo que aplazar la tercera que va a impartir María Ramos Payán, el día 13 de enero de 2023.

En 1221 nació Alfonso X el Sabio, tan vinculado a Sevilla. Con este motivo el académico electo Antonio Durán ha organizado una jornada sobre el Rey santo para el día 17 de noviembre, ya perteneciente al curso 2021-2022. Asimismo, en el ciclo de Historia y Filosofía de la Ciencia y de la Técnica del año 2021 se impartieron las siguientes conferencias sobre este tema:

- 13 de diciembre “Alfonso X el Sabio y la Marina de Castilla”. Profesor D. José Luis de Justo Alpañés.
- 20 de diciembre “Astronomía: la apuesta de Alfonso X por la inmortalidad”. Profesor D. Antonio José Durán Guardado.

Tenemos un poco parado el protocolo general de colaboración con la Universidad Pablo de Olavide, con la que ya tuvimos una primera actividad conjunta, una mesa redonda sobre el coronavirus, con participación de tres ponentes por parte de la RASC: [Antonio Gómez Expósito, José Luis de Justo Alpañés y Miguel Ángel Muniaín, académico numerario de la Real Academia Sevillana de Medicina, (designado por José López Barneo dentro de sus colaboradores) y tres por parte de la Olavide]. Se celebró el día 14 de octubre de 2019.

También en los meses de septiembre y octubre, es decir, en el intervalo entre dos cursos, hemos tenido las conferencias correspondientes al nuevo convenio con la Fundación Cajazol, Los temas elegidos han pertenecido al ámbito de la energía, y han sido los siguientes:

1. Baterías para el almacenamiento de energía. Ponente José Luis Tirado Coello, catedrático de Química en la Universidad de Córdoba e investigador muy importante en este tema, el día 15 de septiembre.
2. El hidrógeno como vector energético. Ponente Javier Brey Sánchez, consejero delegado de H2B2 Electrolysis, el día 22 de septiembre.
3. El precio de la luz. Mercados marginalistas para la electricidad. Conferenciante: Pedro Linares. Profesor propio del Dpto. de Organización Industrial de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, y co-fundador y director de Economics for Energy, el día 6 de octubre.
4. “La energía nuclear en la encrucijada europea”. Conferencia impartida por Manuel Lozano Leiva, físico nuclear, profesor universitario y escritor, el día 13 de octubre.

Los Martes de la Academia del curso 2022-2023 se han impartido o se impartirán en las siguientes fechas:

1. Antonio Gómez Expósito, 18/10/2022 (Tecnología).
2. Montserrat Vilà Planella, 22/11/2022 (Ciencias de la Tierra).
3. Alejandro Conde Amiano, 10/01/2023 (Física).
4. Pedro Jordano Barbudo, 24/01/2023 (Biología).
5. Francisco Sánchez Burgos, 07/02/2023 (Química).
6. Antonio Durán Guardado, 07/03/2023 (Matemáticas).

Se han fijado las fechas de los tres premios del año 2019:

1. El 19 de enero de 2023, Antonio Franconetti García.
2. El 2 de febrero de 2023, Alberto Jiménez Solano.
3. El miércoles 22 de marzo, de 2023 Gonzalo Millán Zambrano.

Las conferencias del ciclo de Historia y Filosofía de la Ciencia y de la Técnica, en colaboración con la Facultad de Química serán las siguientes:

1. El 13 de febrero José Luis de Justo Alpañés.
2. El 20 de febrero Antonio Roselló Segado.
3. El 13 de marzo José Luis Pérez Rodríguez.
4. El 20 de marzo Javier Almarza Madrera.
5. El 27 de marzo Agustín García Asuero.
6. El 8 de mayo Juan Arana Cañedo-Argüelles.
7. El 15 de mayo María de Paz Amérigo.
8. El 22 de mayo Manuel Castillo Martos.
9. El 29 de mayo Francisco J. Soler Gil.
10. El 5 de junio Adela Muñoz Páez.

Estas conferencias suponen, para los asistentes, créditos válidos para los cursos de doctorado de dicha facultad.

Muchas gracias. Se levanta la sesión.



# **HOMOGENIZACIÓN BIÓTICA DE LA TIERRA POR INVASIONES BIOLÓGICAS**

*Discurso de recepción  
como Académica Numerario de la  
Real Academia Sevillana de Ciencias por el  
Ilma. Sra. Dña. Montserrat Vilà Planella,  
celebrado el día 21 de abril de 2022*

## **AGRADECIMIENTOS Y RECUERDOS**

Es para mí un gran honor haber sido elegida para formar parte de esta prestigiosa institución, tener la oportunidad de colaborar con sus miembros y aprender de ellos en múltiples campos de la ciencia. Agradezco a los académicos que me propusieron y a los que han apoyado este nombramiento. En especial al Dr. Cornejo por hacerme el honor en responder a este discurso.

Es el momento de agradecer a muchos profesores de universidad que fueron claves en mi formación como científica. Al Dr. Jaume Terradas del CREAM por dirigirme la tesis y darme absoluta libertad, al Dr. Jacob Weiner de la Universidad de Copenhague por ser el mentor de mi tesis y mostrarme a finales de los años 80 el mundo científico más allá del ámbito nacional, al Dr. Josep Canadell investigador en CSIRO Climate Science Centre de Australia por encaminarme hacia la investigación, al Dr. Francisco Lloret también del CREAM por compartir constantemente sus conocimientos, a la Dra. Carla d'Antonio de la University of California en Santa Bárbara por ser el modelo a seguir como investigadora. Y muchos más, quienes no solo me guiaron en los inicios de mi carrera científica, sino que ofrecieron una amistad que ha perdurado hasta hoy.

También debo reconocer el papel fundamental de los compañeros de la licenciatura en la que fuera Escuela Universitaria de Girona, el doctorado en la Universitat Autònoma de Barcelona y el postdoctorado en la University of California en Berkeley. Más, en estos momentos que a causa de la pandemia, muchos alumnos universitarios, no han podido disfrutar de lleno no solo de clases presenciales, sino de las discusiones cara a cara con sus compañeros de clase, ni que decir de la propia vida universitaria que considero esencial para formarse en ciencia y como personas críticas.

A lo largo de mi carrera científica he sido una afortunada por estar rodeada presencial o virtualmente de una constelación de investigadores e investigadoras excelentes. No me refiero únicamente a su profesionalidad sino también por ser personas honradas, comprometidas, colaborativas y de espíritu abierto. Muchas son mujeres. Soy la tercera mujer que se incorpora como miembro numerario de la Real Academia Sevillana de Ciencias y me siento privilegiada. Hay muchas más que merecen formar parte de la

Academia. A lo largo de mi carrera profesional no me he sentido discriminada, aunque no puedo valorar de forma objetiva si me he tenido que esforzar más que si hubiera sido de otro género.

Es un hecho que muchas mujeres pasan desapercibidas en relación a sus méritos científicos. Por tanto, debemos ser proactivos para visibilizarlas. No me refiero únicamente a que tengan posibilidades de “romper el techo de cristal” sino a simplemente “emerger del lodazal”; que puedan abrirse paso en una profesión tan competitiva como la carrera investigadora. Como sociedad, difícilmente, conseguiremos el reconocimiento de méritos con independencia del género en etapas de madurez profesional si no lo hacemos en las etapas tempranas de su formación como científicas. Aún persisten diferencias, si bien inconscientes, en el trato, en el nivel de exigencia, en la imagen proyectada, en la autoestima entre chicas y chicos que a la larga se traducen en diferencias de oportunidades. Espero participar en iniciativas de la Real Academia Sevillana de las Ciencias que ayuden a diluir estas divergencias. Por ejemplo, mediante la invitación de un mayor número de mujeres conferenciantes, la colaboración estrecha con instituciones universitarias y de investigación donde las mujeres estén más representadas o mediante la convocatoria de premios siguiendo el modelo iniciado por la Fundación Real Academia de Ciencias de España al Joven Talento Científico Femenino.

Debo lo que soy a la generosidad de mis padres, que no escatimaron en mis estudios, de mi padre he heredado la curiosidad, de mi madre el tesón. No concibo la ciencia como un trabajo sino como un *modus vivendi* e incluso un *modus operandi*. En varias ocasiones me han comentado que siempre tuve espíritu academicista. Investigo porque tengo una obsesión por conocer, indagar, aprender; por observar y cuantificar; por relacionar unas cosas con otras, por preguntar constantemente, por contar lo que he aprendido una y otra vez, sin freno. Creo que la perseverancia es una cualidad fundamental en el quehacer de un investigador. Aunque fuera del entorno científico y en altas dosis, pueden ser defectos, que hagan perder la paciencia a amigos y a familiares.

Agradezco inmensamente a mi marido y a mi hijo que compartan su vida conmigo a pesar de estas peculiaridades de mi carácter y mis constantes ausencias, no solo por largas jornadas y viajes de trabajo, sino por estar muchas veces absorta en temas de índole científico y dedicarles menos tiempo del que me gustaría. Su aguante no tiene precio.

## 1. PRÓLOGO

Llevo más de 15 años viviendo en Sevilla. Esta ciudad significa mucho para mí. En Sevilla he formado una familia, he hecho excelentes amistades y me he desarrollado como investigadora de la Estación Biológica de Doñana del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EBD-CSIC). Agradezco al que fuera director del centro en aquella época, al Dr. Fernando Hiraldo y a los miembros del Claustro que confiaran en mí.

Quizás no es casualidad que el tema de investigación al que le he dedicado tantos años, las invasiones por especies exóticas, tenga Sevilla como protagonista histórica por el papel político que jugó en el comercio entre el Viejo y el Nuevo Mundo.



El descubrimiento de América constituyó una gran revolución al intercambio de productos y especies entre continentes y con ello al establecimiento de especies en regiones donde jamás hubieran podido llegar por dispersión natural. Se inicia así el intercambio colombino, la globalización por vía marítima y con ella la intensificación de la dispersión de especies mediada por el hombre. Cristóbal Colón (Colón 1986) en su segundo viaje (1493-1496) relata:

*“Pues la tierra es tal, que deve procurar que se siembre lo más que ser pudiere de todas cosas... De carneros vivos, e aun antes de corderos e corderitas, más fembras que machos, e algunos veseros y bezerras pequeños son menester que cada ves vengan en cualquier caravela que acá se enbiare, e algunas asnas e asnos e yeguas para trabajo e simiente, que acá ninguna d’estas animalias ay que ombre se pueda ayudar ni valer.”*

El descubrimiento de América supuso un punto de inflexión en la entrada en especies exóticas en España, y por ende en Europa. A estas especies se las conoce como “neófitas” para distinguirlas de las “arqueófitas”, especies introducidas en la antigüedad por fenicios, griegos, romanos, árabes, etc. de las que muchas veces nos faltan registros históricos para inferir con certeza su origen. En esta conferencia me centraré en la investigación que estamos llevando a cabo sobre especies “neófitas”.

### **3. INTRODUCCIÓN: DOS EJEMPLOS CERCANOS**

En conmemoración del V centenario de la primera vuelta al mundo invito a que lean algunos de los relatos sobre el interés de los exploradores por la flora y la fauna de territorios lejanos. Pigafetta (Pigafett 2019) relata que muchas especies silvestres eran utilizadas en la vida cotidiana por los indígenas americanos como alimento, como medicinas y con fines recreativos o sagrados. Muchas de estas plantas de origen americano se introdujeron en España como fuente de alimento. Hoy en día no es posible pensar en la dieta típica mediterránea sin tomates o sin patatas.

Otras plantas fueron introducidas por motivos mucho más sofisticados. Por ejemplo, las chumberas (*Opuntia ficus-indica*) llamaron la atención de los exploradores españoles, no por su naturaleza vegetal, sino por los insectos parásitos que albergaban. Estos insectos son cochinillas (*Dactylopius coccus*) que se alimentan de la savia de la planta. El cuerpo de las hembras tiene ácido carmínico, una sustancia de la que se puede extraer un tinte rojo. Este tinte natural fue tan apreciado que los pueblos aztecas en México utilizaron las cochinillas en peso como moneda para rendir sus tributos a su emperador Moctezuma.

Los españoles vieron un gran valor económico en este tinte obtenido de la cochinilla para la industria textil y adquirieron el monopolio de su cría en grandes plantaciones de chumberas principalmente en Oaxaca. Económicamente, el comercio de la cochinilla fue la segunda materia prima más importante después del oro y la plata (DeFelice

2004). Estos insectos eran tan valiosos que los comerciantes de toda Europa venían a Sevilla, la única ciudad española con el privilegio de comerciar con América, para hacer transacciones con este producto. El tinte rojo carmín pronto se convirtió en un artículo de lujo en la industria textil y para el uso de pintores. Para entender su importancia en el status social de la gente, solo hace falta fijarse en el color de la vestimenta de los cuadros de los pintores sevillanos del barroco como Murillo o Velázquez. Marrones y ocres para “el pueblo” y rojos para la nobleza, el ejército, el clero y algunos santos, claro.

En respuesta a las demandas de la industria textil, alrededor de 1820, se decidió introducir chumberas en España para criar los insectos cochinilla. Inicialmente sólo se introdujeron 8 plantas. En el mismo año, los insectos se reprodujeron. En pocos años los cultivos se extendieron a otras regiones de España que tuvieran veranos calurosos e inviernos templados. La producción en Canarias tuvo tanto éxito que a finales del siglo XVIII era el principal productor mundial (Cervera 2021). Se exportaron miles de toneladas de insectos. Sin embargo, la demanda de la producción de cochinilla disminuyó cuando aparecieron los primeros tintes sintéticos basados en anilinas. La agricultura canaria muy dependiente del monocultivo del nopal se desplomó. Muchos terrenos se transformaron en otros tipos de grandes extensiones fueron abandonadas a su suerte favoreciendo la expansión de la planta a otros hábitats (Vilà 2011).

La presencia de chumberas en nuestro paisaje se ha mantenido hasta nuestros días. La percibimos como una planta típica de nuestro entorno que a lo largo de tres siglos ha sido fotografiada y pintada por los más alustres artistas como por ejemplo Sorolla (Fig. 1). Este cactus se ha introducido en muchas otras regiones mediterráneas y semiáridas del mundo para otros fines además de la producción de cochinilla: como planta ornamental o para la construcción de setos defensivos, para el consumo de sus frutos o forraje para el ganado (Fig. 1). Estos cactus tienen una reproducción vegetativa muy exitosa. Cualquier fragmento tiene la capacidad de enraizar.

Sus beneficios para el ganado han sido sobreestimados. La planta tiene un bajo valor nutricional y las espinas y los pelos pueden lesionar la piel, los músculos y la boca del ganado. Los pastos invadidos son evitados por los pastores no sólo para impedir daños a sus rebaños, sino a sí mismos. A finales del siglo XIX, en Australia y Sudáfrica, los agricultores se vieron obligados a abandonar grandes extensiones de pastos invadidos y la especie fue declarada plaga. En España, está listada como planta invasora y por tanto está prohibido que se plante o se comercialice. La extracción mecánica y química no funcionó a pesar de la gran inversión en el manejo. La única solución para reducir el grado de infestación y su propagación se encontró en el control biológico mediante dos insectos parásitos que minan los tallos de la planta. En pocos años muchas plantas murieron y las tierras restauradas de nuevo a pastos y cultivos.

Historias parecidas se ha repetido con muchísimas otras especies exóticas, y en muchísimos otros rincones del planeta. Introducimos especies exóticas con nuestra mejor intención, como fuente de alimento, como especies de compañía, por razones estéticas y de recreo, pero muchas se expanden y escapan más allá de donde fueron plantadas, criadas o confinadas pudiendo causar impactos tanto ambientales como socioeconómicos imprevisibles de los que hablaré más adelante.

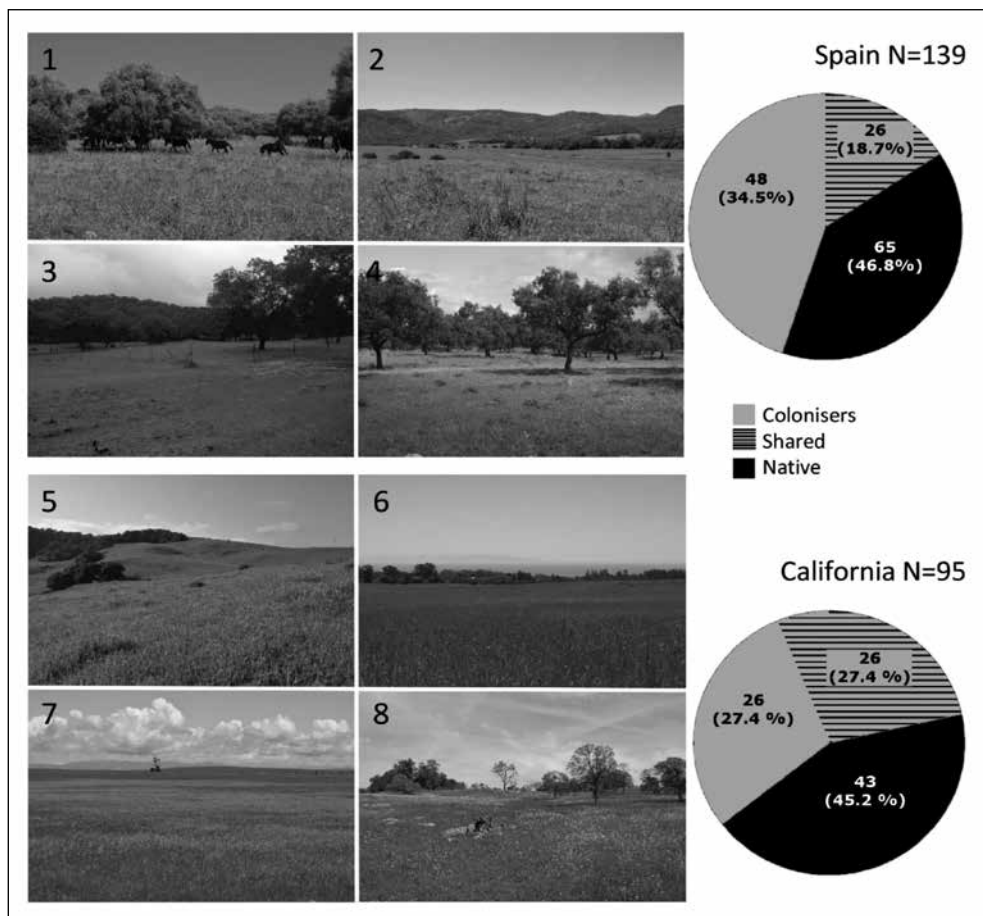
**FIGURA 1**  
**LAS PLANTAS DE NOPAL O CHUMBERAS (*OPUNTIA* SPP.) DE ORIGEN CENTRO-AMERICANO SE HAN PLANTADO EN MUCHAS ZONAS ÁRIDAS COMO SETOS, LO CUAL HA FAVORECIDO LA INVASIÓN DE CULTIVOS ABANDONADOS. LAS CHUMBERAS SON OMNIPRESENTES EN MUCHAS PINTURAS QUE REPRESENTAN PAISAJES MEDITERRÁNEOS. (ABAJO: EL ENCIERRO, SOROLLA (2014) DE LA COLECCIÓN DE LA HISPANIC SOCIETY OF AMERICA)**



La situación inversa, la de especies europeas introducidas en América y en Australasia ha sido mucho más intensa. Crosby (1988) en su libro *Imperialismo Ecológico*, nos describe en qué medida los colonos europeos transformaron el paisaje para que se asemejara al de su tierra natal. Los cambios de uso del suelo en pastos para ganado y la agricultura extensiva cuyo manejo favoreció a las especies exóticas construyeron lo que el historiador acuñó como las *Nuevas Europas*: regiones alejadas del continente europeo con una biota mixta nativa y exótica con una abrumadora dominancia de flora, fauna y población humana de origen europeo.

El Prof. Casado y colaboradores de la Universidad Complutense de Madrid (Casado *et al.* 2018) han verificado que los flujos de introducción de plantas herbáceas entre regiones mediterráneas han sido asimétricas y que la península ibérica ha sido la región donadora por excelencia. Si echamos un vistazo a imágenes de pastizales y sabanas californianas no sabremos distinguirlas de los pastizales y dehesas de Sierra Morena, no

**FIGURA 2**  
**IMÁGENES DE PASTIZALES ANDALUCES (1-4) Y CALIFORNIANOS (5-8). LOS GRÁFICOS CIRCULARES INDICAN EL NÚMERO Y EL PORCENTAJE DE ESPECIES HERBÁCEAS SEGÚN SU ORIGEN. LAS COLONIZADORAS SON ESPECIES DE ORIGEN ESPAÑOL ESTABLECIDAS EN CALIFORNIA. LAS ESPECIES COMPARTIDAS SON ESPECIES COLONIZADORAS OBSERVADAS EN PARCELAS DE MUESTREO EN AMBAS REGIONES. TODAS LAS ESPECIES DE LAS PARCELAS ESPAÑOLAS SON NATIVAS MIENTRAS QUE EN CALIFORNIA SOLO UN 45% DE LAS ESPECIES LO SON. (MODIFICADO A PARTIR DE GALÁN DÍAZ *ET AL.* 2020)**



solo por su fisionomía paisajística sino también por la composición de especies (Fig. 2). Según muestreos que hemos realizado recientemente, en promedio, más de la mitad de las plantas de los pastizales de California son exóticas (Fig. 2). De estas, la mitad se encuentran en Andalucía donde son nativas (Galán Díaz *et al.* 2020). En California, estas plantas en su mayoría gramíneas anuales han sustituido a gramíneas perennes que en el pasado formaban una vegetación mucho menos densa. Las gramíneas anuales compiten con las plantas nativas, muchas endémicas. Además, aumentan el riesgo de incendios

por la acumulación y continuidad de material inflamable durante el verano (D'Antonio & Vitousek 1992).

#### **4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

Estoy fascinada por la influencia del intercambio de especies entre regiones y cómo ha cambiado a lo largo de los siglos hasta nuestros días. Mientras estamos aquí quietos, se está dando el movimiento intercontinental de miles de toneladas de mercancías de todo tipo susceptibles de dispersar especies que se establecieron lejos de las regiones originarias.

He dedicado más de 25 años en investigar la ecología de especies exóticas invasoras, principalmente de especies vegetales. Hoy quisiera compartir con ustedes algunos de los estudios que hemos realizado de corte más biogeográfico o global para acercarme lo más posible a las Ciencias de la Tierra, la disciplina dentro de la cual me han hecho el honor de formar parte de la Real Academia de las Ciencias de Sevilla. Mi investigación a lo largo de todo este tiempo ha venido guiada por la siguiente pregunta: *¿Qué factores contribuyen a que una especie introducida y por tanto exótica se integre en un nuevo ecosistema, y qué consecuencias tiene?* No es una pregunta nueva, ya Darwin (1859) propuso que las especies introducidas que tienen más éxito son las filogenéticamente más alejadas de las especies nativas, es decir, las evolutivamente más distintas a las nativas. Un siglo más tarde, Elton (1958), considerado el padre de la biología de las invasiones expone varias teorías sobre la invasión por plantas y animales. Muchas de estas teorías han tardado más de medio siglo en confirmarse empíricamente. Con modestia, tengo que decir que nosotros hemos contribuido en ofrecer evidencias que avalan algunas de ellas.

Responder a esta pregunta conlleva realizar observaciones y experimentos de campo a distintas escalas espaciales: comparar la ecología de las especies en la región de origen y de introducción, en distintos tipos de hábitats y, sobre todo, contrastar qué diferencias ecológicas hay entre un ecosistema invadido y otro que no lo está. Esta última aproximación es necesaria para identificar los impactos que las especies invasoras ocasionan en los recursos naturales.

Hoy quisiera ofrecer unas pinceladas a tres objetivos fundamentales sobre la investigación en invasiones biológicas, en los que he contribuido significativamente:

1. La identificación de las principales vías de introducción y las etapas del proceso de invasión.
2. El análisis de los factores ecológicos que facilitan las invasiones.
3. La cuantificación de los impactos que ocasionan en la biodiversidad, en los recursos naturales y en el bienestar humano.

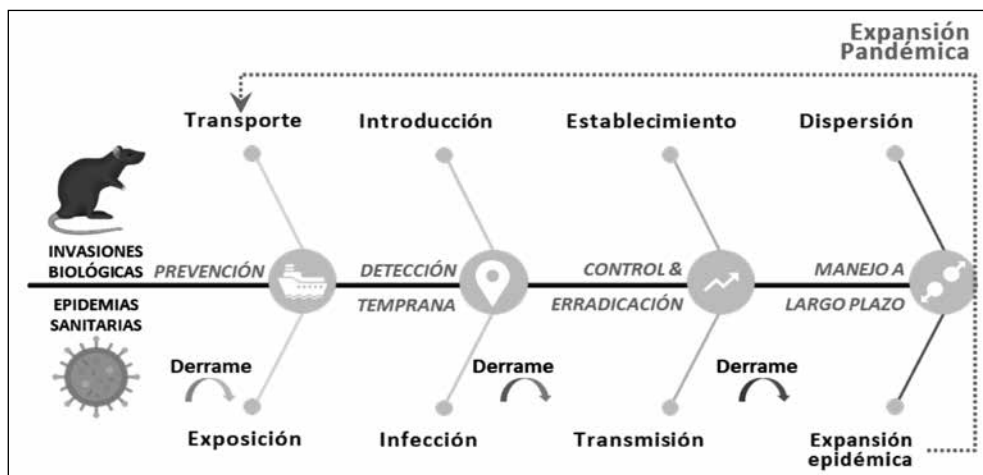
La investigación en estos temas que voy a resumir ha sido desarrollada en gran medida por 12 doctorandos, la mitad mujeres y más de 20 miembros postdoctorales, sin los

cuales, hoy tendría poco que contarles. También quisiera apuntar que muchos estudios han sido concebidos y ejecutados fuera del marco de trabajo de un proyecto de investigación reglado y por tanto con muy poca financiación. Se han desarrollado gracias a nuestras ansias de conocer, por la ilusión de emprender la aventura de un nuevo viaje o por el interés en establecer nuevas colaboraciones. Me consta que muchos ecólogos en nuestro país nos movemos por estos impulsos.

### 5. ETAPAS DEL PROCESO DE INVASIÓN BIOLÓGICA Y VÍAS DE INTRODUCCIÓN

Antes de ahondar en este tema son precisas algunas definiciones. No todas las especies que se introducen se establecen ni todas las que se establecen van a ser invasoras. El proceso de invasión sigue unas etapas que se asemejan mucho a un proceso epidemiológico (Fig. 3). Este proceso consta de transporte, introducción, establecimiento y dispersión. Cuando especies exóticas o sus propágulos son transportadas de una región a otra de forma deliberada o accidental, muchas mueren durante el transcurso del viaje, pero otras son introducidas. Si establecen poblaciones pequeñas que requieren de una contante entrada de propágulos las denominamos subespontáneas, mientras que si establecen poblaciones que se reproducen y crecen por sí solas y perduran en el tiempo las llamamos naturalizadas. Si en poco tiempo se expanden lejos de donde se establecieron inicialmente decimos que son invasoras (Pyšek *et al.* 2020).

**FIGURA 3**  
**COMPARACIÓN DE LAS ETAPAS DE UNA INVASIÓN BIOLÓGICA Y DE UNA EPIDEMIA HUMANA Y LAS POSIBLES ACCIONES DE MANEJO EN ESTAS. LOS PATÓGENOS QUE EMERGEN Y CAUSAN UNA EPIDEMIA EN CUALQUIER PARTE DEL MUNDO PUEDEN SER TRANSPORTADAS Y PROPAGARSE A NIVEL MUNDIAL, LO QUE EN EL PEOR DE LOS CASOS LLEVA A UNA PANDEMIA (FLECHA PUNTEADA EN ROJO). LAS FLECHAS DOBLADAS INDICAN MOMENTOS OPORTUNOS DEL DERRAME DE UN PATÓGENO DE ORIGEN ZONÓTICO DESDE UN ANIMAL HACIA UN HUMANO (VILÀ *ET AL.* 2021)**

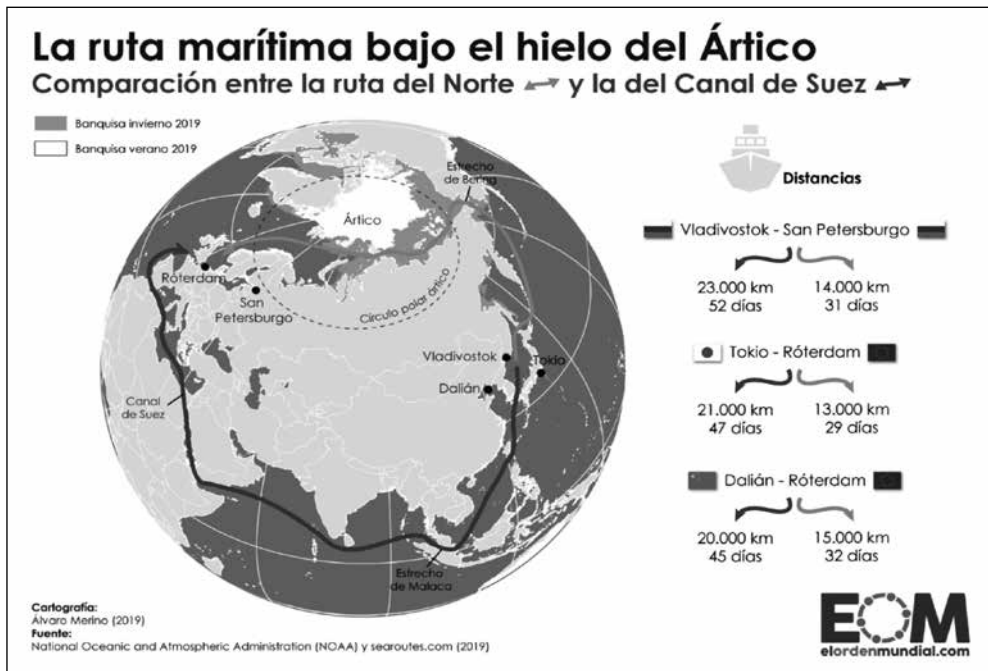


La vía de introducción de especies exóticas puede ser tanto intencionada como accidental (Hulme *et al.* 2008). Actualmente, la principal vía de introducción intencionada de plantas exóticas es por motivos ornamentales, ya sea para ser cultivadas en parques y jardines o en la restauración de obras públicas. La mayoría (> 82 %) de las especies de los parques urbanos de España son exóticas. De estas, un 12 % son invasoras. Incluso algunas están reguladas tanto por la legislación española como por la de Unión Europea y por tanto, deberían eliminarse (Bayón *et al.* 2021). En cuanto a vertebrados e invertebrados acuáticos, la principal vía de introducción intencionada es el mascotismo, la caza y la pesca recreativa. Pensemos en las cotorras del Parque de María Luisa, por ejemplo. No obstante, muchos organismos son introducidos de forma accidental como contaminantes de otros productos o como polizones en los embalajes donde se transportan. Este sería el caso del mosquito tigre (*Aedes albopictus*) que inicialmente se expandió por Europa a través del transporte de neumáticos y recipientes con agua.

**FIGURA 4**

**EL CALENTAMIENTO GLOBAL ESTÁ FACILITANDO NUEVAS RUTAS MARÍTIMAS. EN AGOSTO DE 2017, EL BUQUE METANERO RUSO CRISTOPHE DE MARGERIE NAVEGÓ DESDE NORUEGA HASTA COREA DEL SUR A TRAVÉS DEL ÁRTICO EN TAN SOLO 19 DÍAS, UN 30% MÁS RÁPIDO QUE LA RUTA QUE CRUZA EL CANAL DE SUEZ. FUE EL PRIMERO EN LOGRARLO SIN AYUDA DE UN BARCO ROMPEHIELOS. A LA LARGA, ESTA RUTA MARÍTIMA ÁRTICA SUPONDRÁ UNA ACELERACIÓN EN EL TRANSVASE DE ESPECIES ENTRE EL OCÉANO PACÍFICO NORTE Y EL OCÉANO ATLÁNTICO NORTE DE DIMENSIONES MUY SUPERIORES DE LAS QUE ACTUALMENTE TIENEN LUGAR A TRAVÉS DEL CANAL DE PANAMÁ**

(<https://elordenmundial.com/mapas/hacia-la-ruta-del-artico/>)



Durante las últimas décadas, el establecimiento de especies no nativas de todos los grupos taxonómicos se ha acelerado especialmente debido a la ampliación de las vías de comunicación y al comercio global (Seebens *et al.* 2017). Muchas especies exóticas son introducidas accidentalmente a través de corredores artificiales levantados por grandes infraestructuras. Muchos ríos europeos están conectados. Por ejemplo, desde hace décadas es posible navegar desde el Mar Negro o el Mar Caspio al Mar del Norte o Mar Báltico. Muchos invertebrados acuáticos como por ejemplo el mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*) han sido introducidas pegados en los cascos y en las aguas de lastre de los barcos que circulan por esta ruta.

Otro ejemplo de corredor artificial es el Canal de Suez por el cual muchas especies han migrado del Mar Rojo a la costa Levantina del Mediterráneo oriental, fenómeno que junto con el calentamiento global está contribuyendo a la tropicalización del Mar Mediterráneo. El cambio climático y la puesta en marcha de rompehielos nucleares está posibilitando la ruta marítima ártica que acorta la navegación en 10 días respecto a la ruta del canal de Suez. Es más, en agosto de 2017, el buque metanero ruso Cristophe de Margerie navegó desde Noruega hasta Corea del Sur a través del Ártico en tan solo 19 días, un 30% más rápido que la ruta que cruza el canal de Suez (Fig. 4). En los últimos 5 años, el número de cargueros que la atraviesan se ha multiplicado por 5. A la larga, esta ruta marítima ártica supondrá una aceleración en el transporte de especies entre el océano Pacífico Norte y el océano Atlántico Norte de dimensiones muy superiores a las que actualmente tienen lugar a través del Canal de Panamá.

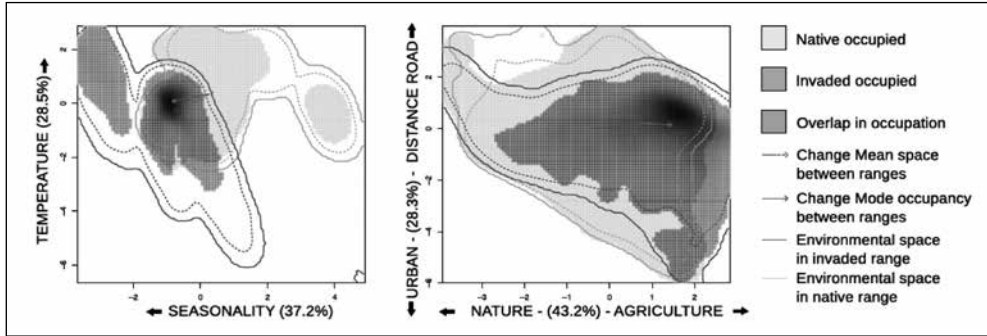
## **6. FACTORES ECOLÓGICOS QUE FACILITAN LAS INVASIONES BIOLÓGICAS**

Parece contra intuitivo que una especie que no ha evolucionado en un ecosistema pueda prosperar, invadir y excluir a las especies nativas. Para plantas, el éxito de invasión depende de tres factores ecológicos principales que son complementarios: la preadaptación o plasticidad a las condiciones ambientales, la pérdida de enemigos naturales y el establecimiento de relaciones mutualistas con las especies nativas de la comunidad receptora.

Hemos realizado muchos estudios tanto a partir de bases de datos de distribución de especies como por ejemplo GBIF como muestreos extensivos de campo para determinar el nicho climático de las poblaciones en ambas regiones. En casi todos los casos hemos encontrado que en la región de introducción muchas plantas invasoras aún no ocupan toda el área de distribución potencial según las condiciones climáticas. Muestreos muy detallados que hemos realizado para la vinagrera, *Oxalis pes-caprae*, en la cuenca mediterránea y en la región nativa de Sudáfrica muestran que en la región de introducción, esta planta se establece en áreas de mayor estacionalidad y temperaturas más bajas que en Sudáfrica (González-Moreno *et al.* 2015). Es decir, que el nicho climático en el que la especie se distribuye en la región de origen y de introducción no se solapa completamente.



**FIGURA 5**  
**REPRESENTACIÓN DEL NICHU CLIMÁTICO (IZQUIERDA) Y DE PERTURBACIÓN (DERECHA) DEL AGRIO (*OXALIS PES-CAPRAE*) EN LA REGIÓN NATIVA DE SUDÁFRICA Y DE INTRODUCCIÓN EN LA CUENCA MEDITERRÁNEA. LA FLECHA ROJA INDICA LA DIRECCIÓN DEL CAMBIO DE NICHU. ESTA PLANTA TIENE AÚN EL POTENCIAL DE INVADIR ZONAS MÁS CÁLIDAS, DE MAYOR ESTACIONALIDAD Y MENOS ALTERADAS (GONZÁLEZ-MORENO *ET AL.* 2015)**

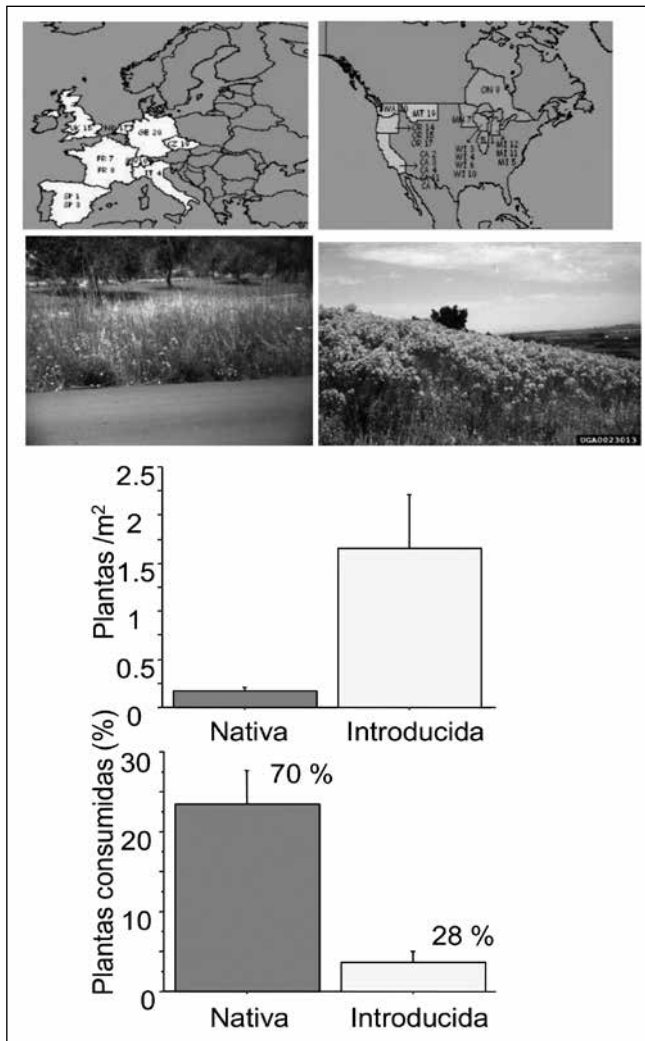


Pero vayamos más allá de los envoltorios climáticos. Si además del clima tenemos en cuenta otros componentes relacionados con el grado de perturbación del paisaje, observamos que en su región de origen ocupa hábitats menos perturbados (González-Moreno *et al.* 2015). En definitiva, esta planta tiene la capacidad de invadir no solo áreas bastante más extensas sino también ambientes más naturales que en la región de origen (Fig. 5). Estos modelos de distribución de especies son de gran utilidad para identificar la vulnerabilidad de un territorio a la invasión en escenarios de cambio climático. Un aspecto en el que estamos investigando y les podría contar en otra ocasión.

En cuanto a los factores bióticos que influyen en la invasión, el que clásicamente ha despertado más interés es la falta de enemigos naturales en la región de introducción. Muchas especies exóticas han dejado atrás los patógenos y parásitos que controlan el tamaño de sus poblaciones. Hace 20 años colaboré con John Maron, profesor de la Universidad de Montana, en un muestreo de poblaciones de la hierba de San Juan o hipérico (*Hypericum perforatum*) en Europa donde es originaria y en Norteamérica donde se introdujo de forma accidental como contaminante en las semillas de plantas forrajeras (Fig. 6). Es una planta que cerca de Sevilla aparece esporádicamente en campos abandonados, en los márgenes de caminos y en zonas ruderales. En cambio, en Estados Unidos y Canadá puede ocupar grandes extensiones de praderas seminaturales donde no hay presión por fitófagos (Fig. 6). En Europa, muchas plantas están parcialmente defoliadas por el coleóptero *Crysolina quadrigemina* mientras que en Norteamérica las plantas están prácticamente intactas (Vilà *et al.* 2005). En Europa también nos encontramos con muchas plantas con tallos secos antes de la época estival debido a la infección por hongos (*Colletotrichum* sp., *Alternaria* sp., *Fusarium* sp.) que atacan el cuello de raíz, mientras que en Norteamérica este fenómeno no ocurre (Fig. 6).

Hemos sido pioneros en realizar los primeros estudios de trasplante intercontinental para determinar si estas diferencias eran adaptativas (Maron *et al.* 2004). Encontramos que efectivamente las poblaciones de Norteamérica poseen concentraciones menores de hipericina, un compuesto secundario fototóxico que puede ser letal para los insectos que consumen la planta. No obstante, esta pérdida de resistencia a los herbívoros no se traduce necesariamente en un aumento del tamaño o fecundidad de la planta.

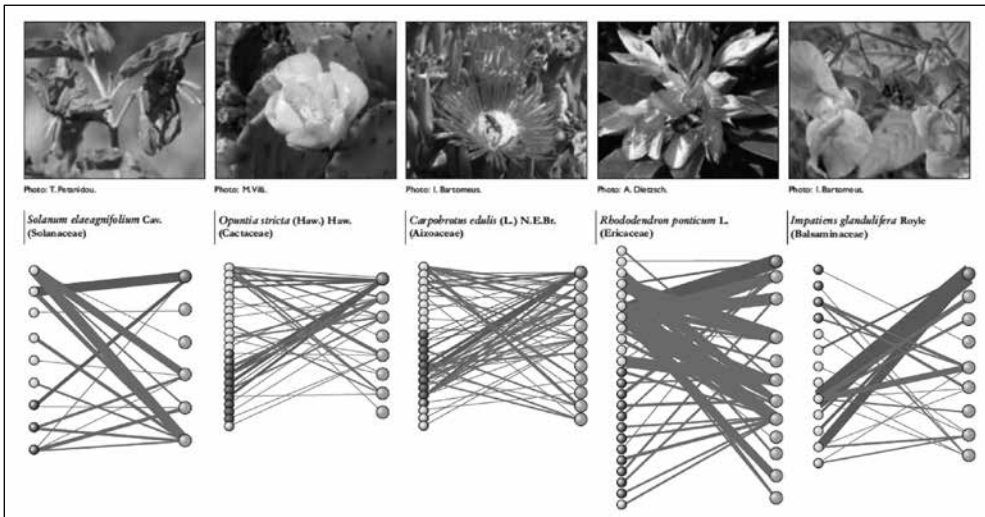
**FIGURA 6**  
**COMPARACIÓN DE LA DENSIDAD DE PLANTAS DE LA HIERBA DE SAN JUAN**  
**(*HYPERICUM PERFORATUM*) Y DAÑO CAUSADO POR HERBÍVOROS EN POBLACIONES**  
**DE LA REGIÓN DE ORIGEN EN EUROPA Y EN LA REGIÓN DE INTRODUCCIÓN EN**  
**NORTEAMÉRICA (VILÀ ET AL. 2005)**



Además de la falta de herbívoros especialistas y parásitos, el establecimiento de nuevos mutualismos puede favorecer que una planta pueda reproducirse y establecerse. A excepción de especies entomófilas con tipos de polinización muy especializada que es la minoría, una gran diversidad de polinizadores se sienten sumamente atraídos por las plantas exóticas, en especial si sus flores son grandes y abiertas (Fig. 7).

Hemos pasado muchas horas observando e identificando los insectos que visitan las flores de plantas invasoras en comparación con las plantas nativas con las que coexisten (Vilà *et al.* 2011). Algunas plantas exóticas como la uña de gato (*Carpobrotus* sp.) pueden tener un efecto magnético y atraer polinizadores también hacia las flores nativas. En cambio, otras plantas exóticas como las chumberas anteriormente mencionadas pueden tener un efecto opuesto: acaparar gran parte de los polinizadores que en consecuencia dejan de visitar a las flores de las plantas nativas poniendo en riesgo su reproducción.

**FIGURA 7**  
**REDES DE POLINIZACIÓN ENTRE INSECTOS (CÍRCULOS DE LA IZQUIERDA) Y PLANTAS (CÍRCULOS DE LA DERECHA). EN ROJO SE MUESTRA LA INTEGRACIÓN DE LA ESPECIE VEGETAL INVASORA DE LA FOTO SUPERIOR (VILÀ ET AL. 2009)**

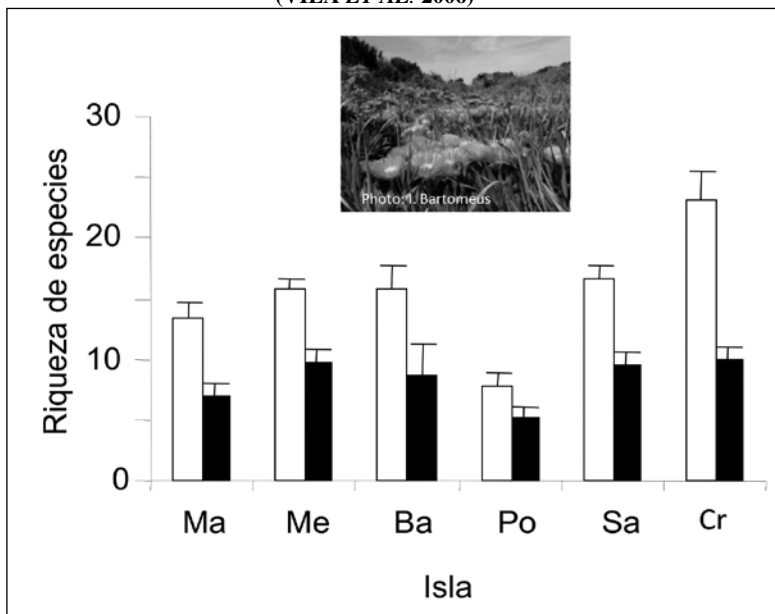


Termino esta parte sobre mutualismos también con las chumberas para resaltar que otra interacción biológica positiva muy importante que contribuye a la expansión es la dispersión de sus frutos y semillas por parte de la fauna nativa. Los higos chumbos son consumidos por un gran conjunto de vertebrados como jabalíes, martas, tortugas, estorninos, zorzales y gaviotas que defecan o regurgitan semillas lejos de donde las consumieron, lo cual facilita su invasión en muchísimos hábitats naturales (Padrón *et al.* 2011).

## 7. IMPACTOS ECOLÓGICOS DE LAS INVASIONES BIOLÓGICAS

Las invasiones biológicas constituyen, junto con otros factores ambientales como la pérdida y fragmentación del hábitat, la eutrofización de los ecosistemas o el cambio climático, uno de los componentes más importantes del cambio global. Hace 10 años realizamos unas encuestas a técnicos en medio ambiente del país para preguntarles cuáles eran según su opinión los principales problemas de los ecosistemas que gestionaban. Los impactos por especies exóticas en sus áreas de trabajo eran considerados un problema mucho más acusado que el cambio climático (Andreu *et al.* 2009). Nos llamó la atención que muchas especies exóticas que consideraban problemáticas no eran necesariamente invasoras. Algunas especies se consideraban una amenaza para la conservación de la biodiversidad, aunque fueran relativamente raras en el territorio, es decir, antes de que se expandieran y fueran invasoras.

**FIGURA 8**  
**EFFECTO DE LA UÑA DE GATO (*CARPOBROTUS* SPP.) EN LA RIQUEZA DE ESPECIES VEGETALES NATIVAS EN LAS ISLAS DE MALLORCA (MA), MENORCA (ME), BAGAUD (BA), PORQUEROLLES (PO), CERDEÑA (SA) Y CRETA (CR). EN TODAS LAS ISLAS LA PÉRDIDA DE ESPECIES EN LAS PARCELAS INVADIDAS ES ALTAMENTE SIGNIFICATIVA (VILÀ ET AL. 2006)**



El impacto ecológico de las plantas invasoras más estudiado es la pérdida de diversidad de especies nativas. El primer estudio que realizamos al respecto fue la comparación de comunidades costeras invadidas y no invadidas por la uña de gato (*Carpobrotus* spp.), una especie de origen sudafricano que, por su tolerancia a la sequía, sus vistosas

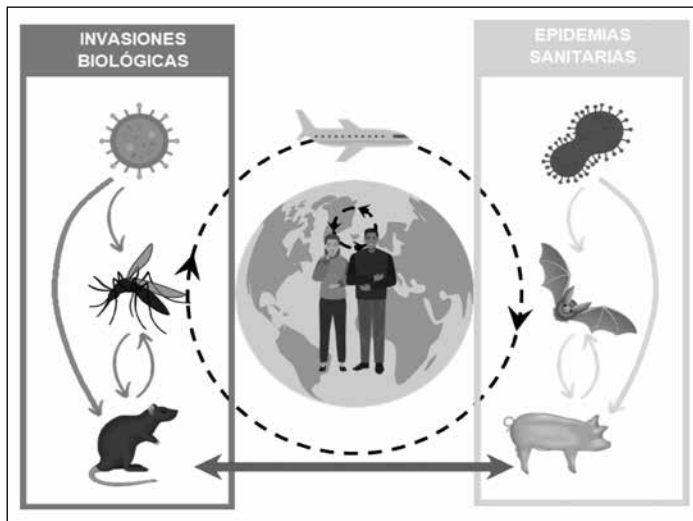
flores y su crecimiento tapizante se ha plantado como ornamental en muchas zonas costeras (Fig. 8). El estudio enmarcado en un proyecto del V Programa Marco de la UE nos permitió replicar el mismo tipo de muestreo en varias islas del mediterráneo. En todos los lugares prospectados, las parcelas invadidas habían perdido casi la mitad de las especies nativas (Vilà *et al.* 2006). Muchos otros estudios ponen de manifiesto que las plantas invasoras disminuyen el éxito reproductivo y el crecimiento tanto de plantas como de animales nativos, producen cambios en la composición de las comunidades y alteran las redes tróficas de las comunidades invadidas (Vilà *et al.* 2011).

Mucho más heterogéneos y dependientes del contexto son los impactos en procesos de los ecosistemas tales como los ciclos de nutrientes, la disponibilidad del agua o la productividad puesto que dependen del tipo de ecosistema invadido, la región biogeográfica y las características de las especies nativas (Castro-Díez *et al.* 2019). El primer estudio al respecto lo realizaron los Profs. Vitousek y Walker (1989) en Hawaïi. *Morella faya* es un árbol endémico de origen macaronésico típico de la laurisilva de las islas Canarias. Esta especie se ha introducido como ornamental en muchas islas del Pacífico, su capacidad de fijar N ha contribuido a la invasión de bancos de la lava y a una aceleración de la sucesión primaria por el aumento de la disponibilidad de N del suelo. Este fenómeno ocurre con la invasión de muchas otras especies fijadoras de N tales como las acacias y las mimosas (*Acacia* spp.) que ocupan extensas áreas de la costa Vicentina de Portugal. Muchos de ustedes quizás piensen, qué hay de malo en que haya más N en el suelo ¿No es eso bueno para las plantas? En ecología, más no es mejor. Muchas especies adaptadas a suelos pobres no sobreviven en suelos muy fértiles y son desplazadas por competencia por especies de crecimiento rápido que son más eficientes en el uso de nutrientes.

## **8. IMPACTOS SOCIOECONÓMICOS DE LAS INVASIONES BIOLÓGICAS**

Las especies invasoras ocasionan impactos de envergadura en todos los servicios ambientales, y por tanto en muchos sectores socioeconómicos primarios tales como la agricultura, la producción forestal, la pesca y la ganadería (Vilà *et al.* 2010). Muchas especies invasoras también pueden afectar la calidad y regulación del agua, los regímenes de perturbación naturales o la conservación de infraestructuras tanto naturales como artificiales. Asimismo, pueden alterar la salud pública, el bienestar humano y la percepción que tenemos de la naturaleza en sí (Vilà & Hulme 2017). En lo que sigue me referiré con más detalle a los impactos en la salud pública y en la percepción de la naturaleza puesto que son los impactos a los que más atención le hemos dedicado últimamente.

**FIGURA 9**  
**INTERACCIÓN ENTRE LAS INVASIONES BIOLÓGICAS Y LAS EPIDEMIAS SANITARIAS.**  
**LA TRANSMISIÓN DE PATÓGENOS PUEDE SER DENTRO DE ESPECIES INVASORAS**  
**(IZQUIERDA), DENTRO DE ESPECIES NATIVAS O GANADERAS (DERECHA) Y A TRAVÉS**  
**DE ESPECIES INVASORAS Y NATIVAS (LA FLECHA INFERIOR). LAS FLECHAS**  
**DISCONTINUAS INDICAN LA TRANSMISIÓN DE PATÓGENOS A LOS HUMANOS**  
**DENTRO DE UNA POBLACIÓN (EL CÍRCULO PEQUEÑO) O**  
**GLOBALMENTE (EL CÍRCULO GRANDE) (VILÀ ET AL. 2021)**



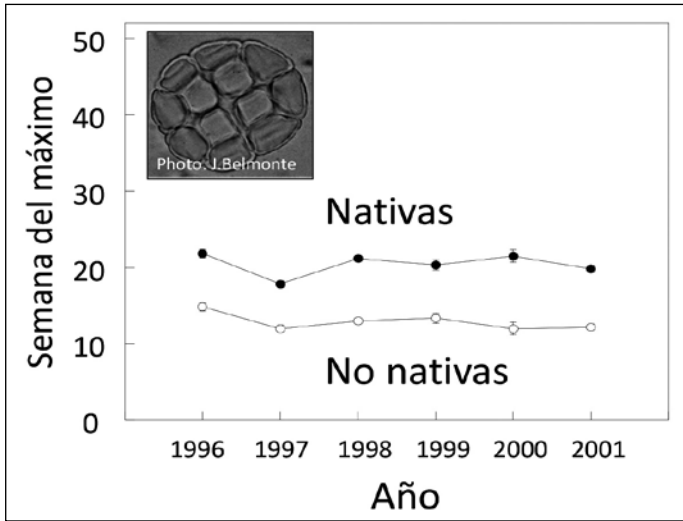
Los impactos en la salud pública son mayoritariamente los riesgos por la transmisión de patógenos o parásitos a través de invertebrados o vertebrados que actúan como vectores o reservorios (Vilà *et al.* 2021). En España, el mosquito tigre, *Aedes albopictus*, puede ser transmisor de enfermedades víricas como la chikungunya o el dengue. En Europa, en zonas donde el mosquito tigre está establecido, ha habido varios brotes de estas enfermedades que han ocasionado centenares de casos de transmisión a partir de viajeros procedentes de áreas donde estas enfermedades son endémicas.

Algunas mascotas pueden ser reservorio de patógenos que ocasionan rabia, salmonelosis, meningoencefalitis, herpes o psitacosis. La transmisión de patógenos puede darse tanto entre especies invasoras, entre especies nativas o ganaderas como entre especies invasoras y nativas (Fig. 9). Las plantas invasoras también pueden facilitar el hábitat de algunos de estos vectores exóticos, tal es el caso del jacinto del agua que proporciona hábitat para la reproducción de mosquitos, además de interferir con la navegación, la pesca e impedir la entrada de luz a la columna de agua.

Otro impacto de plantas exóticas en la salud pública que merece consideración es que muchas producen polen que es alergógeno y sus efectos se hacen notar sin que sean invasoras. Me refiero por ejemplo al ciprés (*Cupressus sempervirens*), la casuarina (*Casuarina equisetifolia*) o los plátanos (*Platanus spp.*) que no se establecen más allá de donde fueron plantados, pero producen una gran cantidad de polen anemófilo. Estas

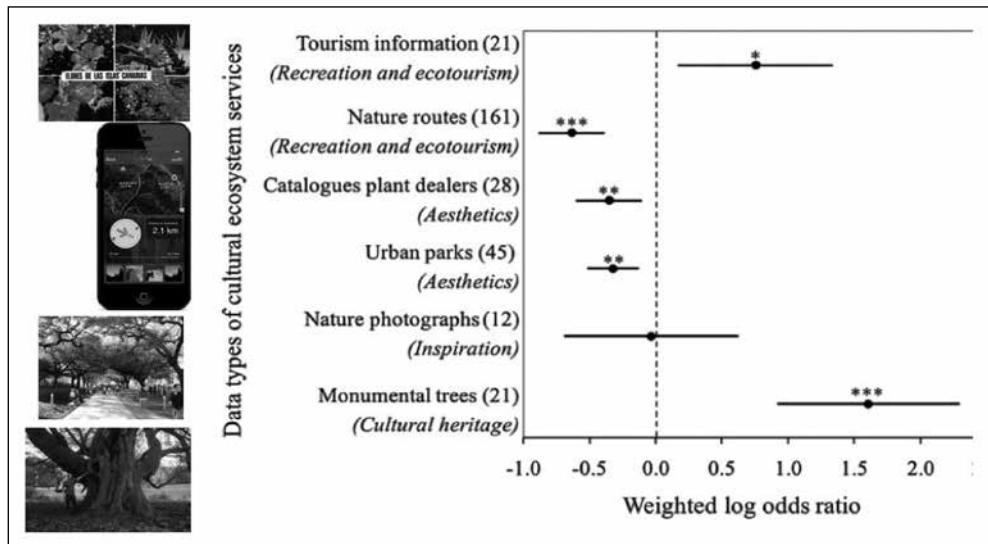
plantas tienen una floración más temprana que el de otras plantas nativas, con lo cual, la ventana temporal de los niveles máximos de polen en la atmósfera son más amplios. Por tanto, el periodo de riesgo alto de alergia por polen se alarga (Belmonte & Vilà 2004; Fig. 10).

**FIGURA 10**  
**MÁXIMOS POLÍNICOS EN EL AIRE PROCEDENTE DE PLANTAS ALERGÓGENAS NATIVAS Y EXÓTICAS. LA PRODUCCIÓN DE POLEN DE LAS PLANTAS DE ORIGEN EXÓTICO ES MÁS TEMPRANA (BELMONTE & VILÀ 2004)**



En las últimas 5 décadas, los costes monetarios ocasionados por los daños causados por las especies invasoras han aumentado en 4 órdenes de magnitud, con un promedio de US\$26.8 billones al año (precio del \$ en 2017). Estos valores son un orden de magnitud mayor que los invertidos en su prevención, control o erradicación (Diagne *et al.* 2021). Para hacernos una idea de la cifra, este valor es mayor que el producto interior bruto de 50 de los 54 países africanos, o 20 veces mayor que el presupuesto anual de la Organización Mundial de la Salud y las Naciones Unidas juntas (Diagne *et al.* 2021). El coste monetario global está subestimado puesto que se basa en datos de los países más desarrollados, con registros en acceso abierto en las lenguas más habladas. Tampoco incluye los costes médicos de muchos patógenos ni los costes indirectos por bajas laborales o desempleo. Sin ir más lejos, si se añade el coste que supondrá la COVID-19 para esta década, sin contar con lo que ha significado la pérdida de vidas humanas, la gráfica se dispara tanto en la cuantificación de los daños como en la gestión de la pandemia. En España, el coste de las gestiones de las invasiones biológicas se estima en unos 4-13 millones de € por año (Angulo *et al.* 2021).

**FIGURA 11**  
**PERCEPCIÓN CULTURAL DE LOS ÁRBOLES EXÓTICOS EN ESPAÑA Y EN PORTUGAL.**  
**LOS VALORES POSITIVOS INDICAN UNA MAYOR PREFERENCIA POR LOS ÁRBOLES**  
**EXÓTICOS QUE POR LOS NATIVOS. LOS NÚMEROS ENTRE PARÉNTESIS INDICAN EL**  
**TAMAÑO DE LAS MUESTRAS UTILIZADAS COMO VALORES DE RECREO Y**  
**ECOTURISMO, ESTÉTICA, INSPIRACIÓN Y DE PATRIMONIO CULTURAL.**  
**LOS ASTERISCOS INDICAN EL GRADO DE SIGNIFICANCIA**  
**(\*P ≤ 0.5, \*\*P ≤ 0.01, \*\*\*P ≤ 0.001) (VAZ ET AL. 2018)**



Muchos impactos en el bienestar humano son intangibles, su valoración es subjetiva, dependiente de valores estéticos, de modas. En definitiva de nuestra percepción (Vilà & Hulme 2017). Hace tres años nos aventuramos a cuantificar el impacto de los árboles exóticos en los servicios culturales en comparación con los árboles nativos (Vaz *et al.* 2018). Buscamos indicadores que fueran *proxis* de los servicios de recreo y ecoturismo, estéticos, de inspiración y símbolos del patrimonio natural (Fig. 11). En Portugal y España, las agencias de turismo prefieren utilizar árboles exóticos en lugar de árboles nativos en sus folletos informativos, mientras que los turistas que hacen senderismo o cicloturismo prefieren tomar fotografías de árboles nativos, lo que sugiere que los proveedores y consumidores del ecoturismo perciben la importancia del origen de los árboles para fines recreativos de manera diferente. Los árboles monumentales también se perciben de manera distinta según sean exóticos o nativos. Preferimos los exóticos. Incluso en algunas regiones, los árboles exóticos se plantan más en los parques urbanos y se ofertan más en catálogos de viveros y floristerías que los nativos. La preferencia cultural por los árboles exóticos frente a los nativos es mayor en regiones con niveles más bajos de desarrollo, con más desempleo y bajo nivel en educación.

Por último, como siempre ocurre con cualquier tema relacionado con la conservación del Medio Ambiente hay muchos conflictos sociales, económicos y culturales en



la valoración de los impactos de las especies invasoras (Vilà & Hulme 2017). Estos son evidentes en el sector forestal. El caso del eucalipto (*Eucalyptus globulus*) es quizás el más paradigmático en nuestro país (Cordero Rivera 2011). La producción del eucalipto sin duda supone una fuente de ingresos debido a su rápido crecimiento. No obstante, es invasor en la región Noroeste de la península ibérica donde ocasiona múltiples impactos en la biodiversidad, en la calidad del suelo y en los regímenes de incendios (Graça *et al.* 2002; Proença *et al.* 2010; Calviño-Cancela *et al.* 2016).

Otro ejemplo nos es muy cercano. La pesca del cangrejo americano (*Procambarus clarkii*) introducido intencionalmente en las marismas del Guadalquivir en el año 1973 para su posterior procesado y exportación como alimento ofrece empleo a buena parte de los habitantes de Isla Mayor. No obstante, los costes del cangrejo en la obstrucción de canales de riego y otras infraestructuras agrícolas a lo largo y ancho del país no se ha evaluado adecuadamente, ni por supuesto, el impacto ecológico que ocasiona en especies acuáticas principalmente en los anfibios, organismos que se encuentran en claro declive (Souty-Grosset *et al.* 2016).

## 9. CONCLUSIONES

La introducción intencional o accidental de especies exóticas promovida por el hombre es un fenómeno que empezó a ganar magnitud con el descubrimiento de América y se ha acelerado a medida que el comercio, el movimiento de gente y el desarrollo de grandes infraestructuras se han incrementado. Muchas especies exóticas son capaces de establecerse, expandirse e invadir el medio natural de la nueva área de introducción.

Además de la necesidad de unas condiciones ambientales acorde para cada especie, la invasión por especies exóticas viene favorecida por la falta de enemigos naturales que las mantenían controladas en las regiones de origen y por el establecimiento de relaciones mutualistas con la biota nativa.

Muchas especies invasoras alteran la biodiversidad y las propiedades de los ecosistemas receptores y por tanto los servicios ambientales que nos prestan. Pueden afectar a todos los sectores socioeconómicos desde la agricultura hasta el turismo pasando por la salud pública.

Al igual que ocurre con las epidemias, es importante ser consciente de que la problemática de las invasiones biológicas requiere de políticas y manejos tanto a escalas globales como nacionales y por supuesto locales.

## 10. EPÍLOGO

He pensado muchas veces porque me dedico a la investigación de este tema ambiental. Hay dos motivos principales. Las invasiones biológicas son un fenómeno fascinante que admite desarrollar investigación tanto básica como aplicada. Son un gran experimento natural que nos permite comprender en tiempo real el efecto de una especie par-

ticular en el funcionamiento de los ecosistemas, en los factores ecológicos y evolutivos que contribuyen al ensamblaje de las especies formando comunidades. Desde el punto de vista aplicado, es una investigación de utilidad para la conservación del patrimonio natural y cultural. Nuestras investigaciones han proporcionado información científica y herramientas útiles como por ejemplo análisis de riesgo para prevenir la entrada de nuevas especies, mejorar su control y paliar sus impactos. Aspectos que puedo exponer con detalle en otra ocasión.

El otro motivo es por ser un tema transversal que no se puede abordar desde un único prisma. Así lo expuse en un encuentro científico organizado por la UNESCO/MAB-SCOPE en El Carmen de la Victoria (Granada) hace 20 años, donde se fraguó el término “nuevos ecosistemas”. Comprender el fenómeno de las invasiones biológicas requiere de investigación interdisciplinar y colaborar con profesionales que tengan una visión amplia tanto de su biología como de su problemática. Precisa integrar aspectos de ecología de poblaciones, de ecología de comunidades y de ecología de ecosistemas y más allá; de otros campos de la biología, de la sociología y de la economía. Soy demasiado inquieta para profundizar en un único nivel de resolución. Me gusta saber un poco de todo y esto me lo ha permitido este tema de investigación. Y reitero, he tenido la suerte de compartir mis inquietudes con estudiantes, colegas y amigos increíbles a quienes agradezco su generosidad.

Muchas gracias.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- ANDREU, J., VILÀ, M. & HULME, P.E. (2009). An assessment of stakeholder perceptions and management of noxious alien plants in Spain. *Environ. Manage.*, 43, 1244-1255.
- ANGULO, E., BALLESTEROS-MEJIA, L., NOVOA, A., DUBOSCQ-CARRA, V.G., DIAGNE, C. & COURCHAMP, F. (2021). Economic costs of invasive alien species in Spain. *NeoBiota*, 67, 267-297.
- BAYÓN, Á., GODOY, O., MAUREL, N., VAN KLEUNEN, M. & VILÀ, M. (2021). Proportion of non-native plants in urban parks correlates with climate, socioeconomic factors and plant traits. *Urban For. Urban Green.*, 63, 127215.
- BELMONTE, J. & VILÀ, M. (2004). Atmospheric invasion of non-native pollen in the Mediterranean region. *Am. J. Bot.*, 91, 1243-1250.
- CALVIÑO-CANCELA, M., CHAS-AMIL, M.L., GARCÍA-MARTÍNEZ, E.D. & TOUZA, J. (2016). Wildfire risk associated with different vegetation types within and outside wildland-urban interfaces. *For. Ecol. Manage.*, 372, 1-9.
- CASADO, M.A., MARTÍN-FORÉS, I., CASTRO, I., DE MIGUEL, J.M. & ACOSTA-GALLO, B. (2018). Asymmetric flows and drivers of herbaceous plant invasion success among Mediterranean-climate regions. *Sci. Rep.*, 8, 1-10.
- CASTRO-DÍEZ, P., VAZ, A.S., SILVA, J.S., VAN LOO, M., ALONSO, Á., APONTE, C., ET AL. (2019). Global effects of non-native tree species on multiple ecosystem services. *Biol. Rev.*, 94, 1477-1501.
- CERVERA, C. (2021). El insecto que España vendía al mundo y que valía más que el oro y la plata americanos. *ABC*.
- COLÓN, C. (1986). *Testamento y Codicilo. Los cuatro viajes. Testamento. Edición de Consuelo Varela*. Alianza, Madrid.

- CORDERO RIVERA, A. (2011). When you cannot see the forest for the trees: effect of forest monocultures on biodiversity conservation. *Acta Biológica Colomb.*, 16, 247-268.
- CROSBY, A.W. (1988). *Imperialismo ecológico. La expansión biológica de Europa 900-1900*. Crítica, Barcelona.
- D'ANTONIO, C.M. & VITOUSEK, P.M. (1992). Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 23, 63-87.
- DARWIN, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or The preservation of favoured races in the struggle for life*. J. Murray, London, UK.
- DEFELICE, M.S. (2004). Prickly pear cactus, *Opuntia* spp.-a spine-tingling tale. *Weed Technol.*, 18, 869-877.
- DIAGNE, C., LEROY, B., VAISSIÈRE, A.C., GOZLAN, R.E., ROIZ, D., JARIĆ, I., *et al.* (2021). High and rising economic costs of biological invasions worldwide. *Nature*, 592, 571-576.
- ELTON, C.S. (1958). *The ecology of invasions by animals and plants*. Methuen, London.
- GALÁN DÍAZ, J., DE LA RIVA, E.G., PARKER, I.M., LEIVA, M.J., BERNARDO-MADRID, R. & VILÀ, M. (2020). Plant community assembly in invaded recipient californian grasslands and putative donor grasslands in Spain. *Diversity*, 12, 193.
- GONZÁLEZ-MORENO, P., DIEZ, J.M., RICHARDSON, D.M. & VILÀ, M. (2015). Beyond climate: disturbance niche shifts in invasive species. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 24, 360-370.
- GRAÇA, M.A.S., POZO, J., CANHOTO, C. & ELOSEGI, A. (2002). Effects of *Eucalyptus* plantations on detritus, decomposers, and detritivores in streams. *Sci. World J.*, 2, 1173-1185.
- HULME, P.E., BACHER, S., KENIS, M., KLOTZ, S., KÜHN, I., MINCHIN, D., *et al.* (2008). Grasping at the routes of biological invasions: a framework for integrating pathways into policy. *J. Appl. Ecol.*, 45, 403-414.
- MARON, J.L., VILÀ, M. & ARNASON, J. (2004). Loss of enemy resistance among introduced populations of St. John's Wort (*Hypericum perforatum*). *Ecology*, 85, 3243-3253.
- PADRÓN, B., NOGALES, M., TRAVESET, A., VILÀ, M., MARTÍNEZ-ABRAÍN, A., PADILLA, D.P., *et al.* (2011). Integration of invasive *Opuntia* spp. by native and alien seed dispersers in the Mediterranean area and the Canary Islands. *Biol. Invasions*, 13, 831-844.
- PIGAFETTA, A. (2019). *La primera vuelta al mundo: relación de la expedición de Magallanes y Elcano*. Alianza.
- PROENÇA, V.M., PEREIRA, H.M., GUILHERME, J. & VICENTE, L. (2010). Plant and bird diversity in natural forests and in native and exotic plantations in NW Portugal. *Acta Oecologica*, 36, 219-226.
- PYŠEK, P., HULME, P.E., SIMBERLOFF, D., BACHER, S., BLACKBURN, T.M., CARLTON, J.T., *et al.* (2020). Scientists' warning on invasive alien species. *Biol. Rev.*, 95, 1511-1534.
- SEEBENS, H., BLACKBURN, T.M., DYER, E.E., GENOVESI, P., HULME, P.E., JESCHKE, J.M., *et al.* (2017). No saturation in the accumulation of alien species worldwide. *Nat. Commun.*, 8, 1-9.
- SOUTY-GROSSET, C., ANASTÁCIO, P.M., AQUILONI, L., BANHA, F., CHOQUER, J., CHUCHOLL, C., *et al.* (2016). The red swamp crayfish *Procambarus clarkii* in Europe: impacts on aquatic ecosystems and human well-being. *Limnologia*, 58, 78-93.
- VAZ, A.S., CASTRO-DÍEZ, P., GODOY, O., ALONSO, Á., VILÀ, M., SALDAÑA, A., *Et al.* (2018). An indicator-based approach to analyse the effects of non-native tree species on multiple cultural ecosystem services. *Ecol. Indic.*, 85, 48-56.
- VILÀ, M. (2011). Prickly pear cacti, a spiny issue. In: *Weird conquerors - invasive plants and animals in Europe* (ed. Nentwig, W.). Haupt-Natur, Bern.
- VILÀ, M., BARTOMEUS, I., DIETZSCH, A.C., PETANIDOU, T., STEFFAN-DEWENTER, I., STOUT, J.C., *et al.* (2009). Invasive plant integration into native plant-pollinator networks across Europe. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, 276, 3887-3893.
- VILÀ, M., BASNOU, C., PYŠEK, P., JOSEFSSON, M., GENOVESI, P., GOLLASCH, S., *et al.* (2010). How well do we understand the impacts of alien species on ecosystem services? A pan-European, cross-taxa assessment. *Front. Ecol. Environ.*, 8, 135-144.

- VILÀ, M., DUNN, A.M., ESSL, F., GÓMEZ-DÍAZ, E., HULME, P.E., JESCHKE, J.M., *et al.* (2021). Viewing emerging human infectious epidemics through the lens of invasion biology. *Bioscience*, 71, 722-740.
- VILÀ, M., ESPINAR, J.L., HEJDA, M., HULME, P.E., JAROŠÍK, V., MARON, J.L., *et al.* (2011). Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecol. Lett.*, 14, 702-708.
- VILÀ, M. & HULME, P.E. (2017). *Impact of biological invasions on ecosystem services*. Springer International Publishing, Cham.
- VILÀ, M., MARON, J.L. & MARCO, L. (2005). Evidence for the enemy release hypothesis in *Hyperricum perforatum*. *Oecologia*, 142, 474-479.
- VILÀ, M., TESSIER, M., SUEHS, C.M., BRUNDU, G., CARTA, L., GALANIDIS, A., *et al.* (2006). Local and regional assessments of the impacts of plant invaders on vegetation structure and soil properties of Mediterranean islands. *J. Biogeogr.*, 33, 853-861.
- VITOUSEK, P.M. & WALKER, L.R. (1989). Biological invasion by *Myrica faya* in Hawai'i: plant demography, nitrogen fixation, ecosystem effects. *Ecol. Monogr.*, 59, 247-265.

## **DISCURSO PRONUNCIADO POR EL ILMO. SR. D. JUAN CORNEJO SUERO**

*Académico Numerario,  
en contestación al leído por  
la Ilma. Sra. D<sup>a</sup>. Montserrat Vilà Planella,  
en el acto de su recepción como académica numeraria,  
celebrado el día 21 de abril de 2022*

Excmo. Sr. Presidente de la RASC, Excmos. e Ilmos. Sres. académicos y autoridades, compañeros y amigos, señoras y señores,

Aunque se ha comentado con cierta frecuencia en reuniones de nuestra institución e incluso públicamente, creo conveniente volver a recordar que estamos reunidos para celebrar, al menos yo así lo considero, el acto más solemne de los que organiza nuestra Academia. Y lo es porque al igual que en una familia se celebra con gran alegría y gozo el crecimiento de la mimá, por la llegada de un nuevo miembro, hoy en nuestra gran familia académica nos congratulamos de acoger a una de las científicas más relevantes en la actualidad, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, reconocida a escala nacional e internacional, como nos ha mostrado en su brillante exposición la profesora Montserrat Vilà, con su discurso titulado *Homogenización biótica de la Tierra por invasiones biológicas*.

Lo mismo que este acto de la Academia lo es de alegría, también hay que decir que el más triste es el de la pérdida de un miembro de esta institución. En la Sección de Ciencias de la Tierra, creada junto a la de Tecnología en 1993, a la que se incorpora la nueva académica, hemos sufrido la pérdida en muy poco tiempo de los pioneros de nuestra sección, los profesores Emilio Galán Huertos, Guillermo Paneque Guerrero y Francisco Ruiz Berraquero, quienes desde la Geología, Edafología y Microbiología, respectivamente, comenzaron a colocar los cimientos de la Sección de Ciencias de la Tierra de esta Academia, a partir de su toma de posesión como numerarios en 1995. Hasta 2007 no se incorpora un nuevo miembro a esta sección, en este caso, el que les habla. Aumenta la nómina con la incorporación del Prof. Diego de la Rosa Acosta en 2013 y de la primera mujer de la sección y segunda de la RASC, la Prof. María del Carmen Hermosín Gaviño en 2018 y, posteriormente, la del Prof. Joaquín Rodríguez Vidal, en 2019. Sin la pérdida de nuestros pioneros, y con la entrada de la Prof. Vilà, hoy se completaría la nómina de miembros de nuestra sección. Esta sección está constituida, por ahora, por científicos de diversa formación (Química, Edafología, Geología y Biología) desde cuyas respectivas perspectivas proyectan una visión conjunta de distintos aspectos que caracterizan a nuestro planeta y de esta forma pueda cumplir los objeti-

vos para los que fue creada, llenando espacios propios de las diversas materias que se agrupan y generando un cuerpo de conocimientos que la Real Academia Sevillana de Ciencias necesita.

Es para mí un honor el haber sido designado por la Academia para contestar en nombre de la institución al discurso de recepción de la nueva numeraria. A este honor ha de sumarse la satisfacción de que la Sección de Ciencias de la Tierra incorpore a la tercera mujer numeraria de la Academia y segunda en la sección. Además, he de reseñar que la propuesta de los miembros de nuestra sección tiene de particular que se hizo sin conocer personalmente a la Dra. Vilà. Cuando pensamos que había que aumentar el número de miembros de la sección, tras la desaparición en muy poco tiempo de nuestros tres compañeros citados, se buscaron los mejores CV, idóneos para cubrir una plaza de numerario de nuestra sección, y entre los seleccionados hubo uno que coincidió con otro de los CV sugeridos por colegas de la Sección de Biología, a los que se les pidió opinión. Era el perfil de la Prof. Montserrat Vilà. Tras su presentación a la Junta General de la Academia y previo examen de su CV por los miembros de la misma y posterior votación, fue proclamada académica electa por unanimidad.

Montserrat Vilà es natural de La Selva de Mar un pueblecito de Gerona, siendo probablemente este hecho la causa por la que estudió Biología, al estar desde pequeña y a diario, en contacto con la naturaleza. Profesora de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en la Estación Biológica de Doñana, (EBD-CSIC) en Sevilla, es doctora en Ciencias Biológicas por la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB). Después de un postdoctorado de dos años en la Universidad de California en Berkeley, se reincorporó al Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF), de la UAB, como Secretaria Científica y ejerció como profesora titular de Ecología en esa Universidad. En la Estación Biológica de Doñana se incorpora hace 16 años como investigadora científica y ha ejercido como jefa del Departamento de Ecología Integrativa y Vicedirectora de Investigación. Sigue estando vinculada a la docencia universitaria como profesora asociada de la Universidad de Sevilla y profesora del Programa de Doctorado de la Universidad Pablo de Olavide. Ha sido profesora visitante de la *University of Montana* (Missoula), *University of Michigan* (Ann Arbor), *Trinity College* (Dublin), *Institute of Technology* (Sligo, Irlanda), CABI (Egham, Inglaterra) y CSIRO (Canberra).

Es presidenta de la *European Working Group on Biological Invasions* (NEOBIOTA) como referente de la investigación sobre la ecología de las especies exóticas. Con 12 tesis doctorales dirigidas, más de 200 artículos ISI, más de 40 capítulos de libro y 7 libros editados, tiene un  $h = 67$  en SCOPUS y en  $h = 84$  en Google Académico. En los 8 últimos años se encuentra entre el 1% de los investigadores mundiales más influyentes en el área de Ecología/Medio Ambiente (*Clarivate Analytics*).

Comprometida con la transferencia del conocimiento para la gestión y las políticas ambientales, en especial sobre las implicaciones de la introducción de especies exóticas, ha divulgado muchos trabajos en medios de comunicación para un público general, para distintos colectivos profesionales y también en revistas multidisciplinarias internacionales de gran prestigio como *Science* o *Trends in Ecology and Evolution*. Es miembro de

paneles científicos nacionales e internacionales tales como el Comité Científico sobre Flora y Fauna del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, el grupo de Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) especialista sobre especies invasoras y el Foro Científico para la Regulación EU sobre Especies Exóticas Invasoras.

Sus investigaciones han tenido aplicaciones directas sobre la conservación de los recursos naturales. En el ámbito europeo, coordinó el primer sistema de información sobre las especies consideradas más invasoras (DAISIE) y el primer listado de plantas exóticas con potencial invasor encomendado por la Dirección General de Medio Ambiente de la EU. Destaca además, el desarrollo y puesta a punto de protocolos de análisis de riesgo que prioricen a las especies invasoras en función de los impactos que puedan ocasionar. El protocolo EICAT se ha erigido como el estándar de la IUCN para clasificar estas especies siguiendo una metodología homóloga a la Lista Roja de especies amenazadas. Actualmente como miembro científico de la Plataforma Intergubernamental sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) participa en la realización de un diagnóstico sobre los impactos de las invasiones biológicas a nivel mundial. Este diagnóstico tendrá sin duda una gran trascendencia en las políticas no solo ambientales sino en muchos otros sectores de la sociedad.

La Prof. Vilà ha estado sumamente implicada en tareas de gestión científica, organizando multitud de congresos y talleres tanto nacionales como internacionales. En España, ha sido miembro de la Comisión de Área de Recursos Naturales del CSIC y ha sido coordinadora del área de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología de la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva/Agencia Estatal de Investigación (ANEP/AEI). A nivel internacional, ha formado parte del panel de evaluación ERC *Consolidator Grants* en Ecología, Evolución y Biología Ambiental, así como de proyectos ERANET-Biodiversa, la Academia Finlandesa de Ciencias, de instituciones alemanas (ej. DFG, *Sino-German Center for Research Promotion*), etc. También ha sido miembro del jurado del Premio Margalef en Ecología y de los Premios a la Conservación de la Biodiversidad de la Fundación BBVA. Es editora asociada de las revistas científicas *Ecology Letters*, *Biological Invasions*, *NEOBIOTA* y *Bioscience*.

Ha recibido numerosos premios, acreditaciones y honores, entre los que se incluye en 2006 el Zayed Prize for Scientific and Technological Achievements in Environment de los Emiratos Arabes, en 2020 el North-South Prize from the Council of Europe to the Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change (MedECC), así como la Distinción Ecosistemas Luís Balaguer 2020 otorgado por la Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET), en reconocimiento a su excelente trayectoria y dedicación a la investigación, la transferencia de conocimiento y la gestión científica en el ámbito de la ecología terrestre. Además de todos los datos expuestos que acompañaban a su candidatura a la Academia, el año pasado recibió el *Mercer Award* de la *Ecological Society of America* por la coautoría al mejor artículo de investigación ecológica liderado por una investigadora joven, la profesora Bethany Bradley de la Universidad de Massachusetts. y como colofón hace unos meses recibió el Premio Nacional de Investigación “Alejandro Malaspina” en el área de Ciencias y Tecnologías Ambientales.

En la brillante exposición de la Prof. Vilà ha quedado claro el origen antropogénico de los problemas derivados de la proliferación de las especies exóticas invasoras en todos los ecosistemas que nos rodean, tanto terrestres como acuáticos. Ha investigado la ecología de invasiones biológicas por organismos exóticos, lo que la ha llevado a desarrollar diferentes áreas de investigación como:

Descripción de la macroecología de las invasiones por plantas exóticas, en la que ha identificado cuales son los hábitats más invadidos a escala de paisaje, a escala nacional, europea y de cuenca Mediterránea, concluyendo que los hábitats más invadidos son zonas con influencia urbana y terrenos agrícolas, zonas costeras y bosques de ribera donde el hombre ha intervenido. Este comportamiento se repite en todas las regiones mediterráneas del mundo. En Europa, los países más invadidos son los económicamente más desarrollados con condiciones climáticas templadas. Asimismo, ha descrito cómo actividades humanas del pasado explican mejor las invasiones contemporánea que las actividades humanas actuales, por lo que parece que habría que indagar más en la historia para entender qué especies invaden hoy y cuales lo harán en el futuro.

Otro aspecto que ha llamado la atención en las investigaciones de la Dra. Vilà es el efecto del cambio global en las invasiones, habiendo identificado los efectos tanto del cambio climático como del cambio de uso de los suelos en el establecimiento de estas especies. Recientemente, ha modelizado la distribución presente y futura de 100 de las especies más invasivas en hábitats europeos terrestres, de aguas continentales y marinas. Por ahora, muchas áreas protegidas están libres de las especies más importantes que invaden el continente. Sin embargo, los escenarios de cambio climático previstos indican que las especies exóticas se expandirán rápidamente al Norte y Este de Europa. Además, también ha mapeado los aumentos y disminuciones de las invasiones dependiendo de cambios socioeconómicos futuros para identificar las áreas más vulnerables a la invasión.

Una tercera área de investigación de la nueva Académica es el análisis de los impactos ecológicos y socioeconómicos de las invasiones, habiendo demostrado que las especies de plantas invasivas reducen la diversidad de la flora y fauna nativa, alterando el flujo de la energía y cambiando el ciclo de nutrientes. Usualmente, una vez que la sociedad o la Administración se da cuenta de las consecuencias económicas de las invasiones, es demasiado tarde para reducir sus impactos medioambientales. Recientemente, ha coeditado un libro sobre los impactos de especies invasivas en los servicios ecológicos, incluyendo los culturales, ilustrando la importancia de identificar los conflictos entre sectores socioeconómicos que perciben y valoran de forma diferente los efectos de las invasiones biológicas.

Hay un aspecto en el discurso de la nueva académica que me ha interesado especialmente, por estar su contenido relacionado con la Ciencia del Suelo, a cuyo estudio me he dedicado y me gustaría profundizar. Es el relativo a los impactos ecológicos de las invasiones biológicas de ciertas especies vegetales en los ecosistemas terrestres, siendo estos impactos, como ella ha dicho, mucho más heterogéneos y contexto dependientes en procesos tales como la disponibilidad hídrica, los ciclos de nutrientes y en la productividad y biota de los suelos invadidos. Estos procesos podrían considerarse impactos



físicos, químicos y biológicos, respectivamente, de las invasiones por plantas exóticas en los suelos afectados<sup>3</sup>

Si meditamos un poco sobre el proceso de invasión de ecosistemas por organismos exóticos que nos ha expuesto la Prof. Vilà, y en un contexto de deterioro del Medio Ambiente, podríamos pensar en algo similar a lo que ocurre con el proceso de la contaminación. ¿Se puede considerar la invasión por distintas especies de los diversos ecosistemas como contaminación? Si admitimos como contaminación la presencia en el ambiente de sustancias o elementos dañinos para los seres humanos y los ecosistemas terrestres, aéreos y acuáticos, creo que podría considerarse como un caso de contaminación biológica de los diferentes compartimentos. Pienso que podría establecerse un paralelismo entre ambos procesos, sobre todo entre el de la contaminación difusa, ya sea por introducción accidental o intencionada, y el de las especies invasoras. Pensemos en el caso del DDT. Esta molécula se introduce en Italia para combatir el tifus y la malaria, así como en Argelia y en islas del Pacífico, y aparece al cabo de años en diferentes sitios del planeta, incluso en zonas aisladas del polo norte, donde nunca se aplicó. Por otro lado, observamos cómo tras introducir esta molécula con unos fines, se comprobó posteriormente que se habían originado unos efectos indeseados. Así pues, si consideramos la invasión biológica de ecosistemas terrestres como contaminación del suelo, hay que tener presente que el suelo tiene un papel esencial en la regulación de procesos ecosistémicos, pero también como determinante de la composición de las comunidades vegetales. Las invasiones por plantas exóticas pueden alterar profundamente el contenido y el ciclo de determinados nutrientes del suelo, así como modificar las comunidades de microorganismos edáficos. Estos cambios pueden contribuir al proceso de invasión a través del establecimiento de ciclos de retroalimentación positivos entre la especie exótica y el suelo, o de efectos negativos directos en las plantas nativas por el aumento de patógenos generalistas, el empobrecimiento de poblaciones de mutualistas nativos y la transformación de las comunidades encargadas de la descomposición y reciclado de nutrientes. Estos datos contribuyen al creciente número de estudios que demuestran el importante papel desempeñado por las comunidades microbianas edáficas en la estructura y dinámica de las comunidades vegetales. Por ejemplo, el género *Acacia* en general, incluye especies originarias de Australia, África y América. Su introducción masiva en los dos últimos siglos con fines forestales, industriales y ornamentales en distintos lugares del mundo y la posterior naturalización de muchas de ellas, han hecho que las acacias australianas sean en la actualidad uno de los grupos con más especies invasoras. Existen en todos los continentes, excepto en la Antártida, estableciendo extensas formaciones monoespecíficas que excluyen a otras especies nativas y producen impactos tanto en la estructura y función de los ecosistemas como en los servicios derivados.

Como ha indicado la Prof. Vilà en su discurso, y hemos apuntado anteriormente, las invasiones biológicas de ciertas especies vegetales ejercen un gran impacto en procesos tales como la disponibilidad hídrica, los ciclos de nutrientes y en la productividad y biota del suelo, que comentaremos brevemente, en base a los numerosos trabajos que la nueva académica y sus colegas ha publicado.

### **IMPACTOS EN ASPECTOS FÍSICOS: DISPONIBILIDAD DEL AGUA**

Es bien conocido que las plantas invasivas modifican el hábitat físico de ecosistemas, especialmente del suelo, mediante cambios de regímenes tales como inundaciones, erosión y fuegos forestales. Los cambios en la estructura de las comunidades vegetales alteran propiedades del suelo como el potencial de almacenamiento de agua y la porosidad del suelo, lo que influye en la conductividad hidráulica del mismo. Por tanto, se alteran los ciclos hidráulicos mediante cambios en la velocidad y tiempos de la evapotranspiración, escorrentías y niveles de capas freáticas, pudiendo afectar al consumo humano. La humedad del suelo está influenciada por la profundidad de las raíces, originando cambios en la flora microbiana de la rizosfera, lo que puede beneficiar invasiones posteriores. Además del efecto de la profundidad de las raíces en la mayor velocidad de evapotranspiración, hay que tener en cuenta el mayor tamaño de las plantas y del área de sus hojas, que el de las especies nativas. Un buen ejemplo es el de la invasión del taraje, *Tamarix*, nativa en Europa e introducida en América, conocida por su capacidad de alterar la cantidad de agua y su dinámica en el ecosistema debido al gran tamaño de sus hojas.

El mismo efecto se ha observado en los ecosistemas invadidos por acacias australianas. Este impacto se ha observado principalmente en Sudáfrica, afectando tanto al uso del agua por la vegetación como a la cantidad y calidad de agua disponible. En general, las acacias forman doseles vegetales densos que aumentan la pérdida del agua en el suelo debido a las altas tasas de transpiración. Estudios en distintos ecosistemas invadidos en Sudáfrica y también en Portugal, han detectado que las acacias presentan una mayor evapotranspiración que la vegetación nativa. Al mismo tiempo, la invasión reduce la calidad del agua de ríos y riachuelos por la eutrofización derivada de una entrada muy elevada de nutrientes y materia orgánica provenientes de la gran cantidad de hojarasca producida por estas plantas. Por otra parte, la invasión por acacias puede aumentar el riesgo de inundaciones incluso a niveles moderados de precipitación. Esto se debe a que la gran cantidad de hojarasca acumulada en las zonas invadidas aumenta la intensidad de los incendios, lo que está directamente relacionado con la repelencia al agua del suelo. Por tanto, incendios más intensos provocan que exista una menor infiltración aumentando la escorrentía, la erosión y las inundaciones. Así pues, aunque las especies nativas se supone serían mejores en la competencia por el agua, debido a su teórica mejor adaptación, las especies invasivas han demostrado ser mejores competidoras en ambientes deficitarios de agua. Un caso similar es el que se observa en Galicia con la producción de eucaliptos, como ha indicado la Dra. Vilà en su discurso.

### **IMPACTOS EN ASPECTOS QUÍMICOS: CICLO DE NUTRIENTES**

Un estudio de gran repercusión científica en la investigación sobre plantas invasoras fué un meta-análisis global realizado por la Dra. Vilà en 2011 sobre 199 artículos y 1041 estudios de campo, en el que concluyeron que las plantas invasoras tenían un efecto

significativo en 11 de los 24 tipos diferentes de efectos estudiados. De media, la abundancia y diversidad de las especies residentes disminuían en los sitios invadidos, mientras la producción primaria y diversos procesos ecosistémicos aumentaban. En cuanto a nutrientes, encontraron que mientras que las especies invasoras fijadoras de N tenían un impacto mayor en las variables de los ciclos del N, no afectaban de forma importante a otros tipos de impactos.

Las plantas invasivas afectan la química del suelo de los ecosistemas tanto por vía directa como indirecta. Los exudados de raíces y hojas de las plantas invasoras afectan tanto a la estructura del suelo, que pueden movilizar y quelar nutrientes, como a la actividad microbiana. Los impactos de la invasión por plantas en la química del suelo son debidos a la modificación en los ciclos del carbono, nitrógeno y otros elementos, materia orgánica del suelo, agregación del suelo, pH y liberación de sustancias alelopáticas. Uno de los impactos más ostensibles de la invasión de plantas en las propiedades químicas del suelo es la alteración de los restos vegetales y de la dinámica de nutrientes en el ecosistema. Un caso muy estudiado es el de la alteración de los niveles de nutrientes del suelo por invasiones de acacias, como ha mencionado la Dra. Vilà en su discurso. Este proceso, que ocurre también con otras especies invasoras, se ve agravado por el hecho de ser especies que establecen simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno. La fijación de nitrógeno es generalmente mucho más eficiente en las acacias australianas que en las leguminosas leñosas nativas de los sitios invadidos que las contienen, lo que hace que el contenido foliar en nitrógeno sea también más elevado. Esto unido a la gran cantidad de hojarasca de descomposición lenta producida por estas especies, explica el gran aumento de los niveles de materia orgánica y nutrientes detectados en las zonas invadidas por acacias. El efecto de la invasión en el contenido de nutrientes en suelo se ha documentado fundamentalmente para especies que invaden dunas costeras y zonas de bosque o matorral. Todas estas especies, aunque invaden suelos muy diferentes, conducen a un aumento en los niveles edáficos de materia orgánica, nitrógeno y carbono totales, nitrato, amonio, calcio, sodio, fósforo intercambiable y potasio disponible. En cambio, el efecto de la invasión sobre el pH edáfico no es tan uniforme, dependiendo en algunos casos del tipo de suelo invadido.

La mayor disponibilidad de nitrógeno en zonas invadidas por acacias conduce a una disminución de la diversidad de plantas. Sin embargo, la invasión también puede provocar un aumento del contenido foliar en nitrógeno de especies nativas, cuyo origen es el nitrógeno fijado en los nódulos radiculares de las acacias invasoras. El efecto observado sobre los contenidos de nutrientes depende del tiempo de invasión. En los estadios muy iniciales de invasión no hay cambios en el nivel de nitrógeno inorgánico en suelo, como demuestran estudios de descomposición de hojarasca en suelos no invadidos. Esto se debe a que la hojarasca de acacia contiene metabolitos secundarios que ralentizan su descomposición. Esto también implica que la eliminación de la hojarasca sea importante para la restauración de zonas invadidas, ya que así se evita una entrada continua de nutrientes en el suelo.

La invasión por estas plantas no sólo modifica la concentración de nutrientes sino también los ciclos biogeoquímicos. Los flujos de carbono y nitrógeno son los más afect-

tados debido a la gran cantidad de hojarasca rica en nitrógeno que se acumula bajo el dosel de las acacias. El aumento en carbono orgánico proveniente de la hojarasca incrementa la actividad microbiana en el suelo y por tanto modifica el proceso de reciclaje de nutrientes. Altos niveles de nitrógeno conducen a un aumento en la biomasa de las plantas invasivas y un decrecimiento en la de las plantas nativas. Ello es debido a que las invasoras son más eficientes en utilización de recursos y tienen menos requerimientos de nutrientes que las especies nativas.

Los impactos de las plantas invasoras sobre los ciclos del N y del C están bastante estudiados, al contrario de los estudios sobre el ciclo del fósforo y de cationes. En general se suele encontrar una correlación entre grado de invasión y el aumento del fósforo en el suelo. En cuanto a los cationes parece que su evolución depende de las condiciones del suelo invadido.

Una causa del éxito de las plantas invasoras por modificaciones químicas del ecosistema es la alelopatía. Ello es debido a que los compuestos aleloquímicos son liberados normalmente por raíces, tallos, hojas o flores que afectan negativamente a las plantas nativas próximas. Es más, cuando las moléculas exudadas por las plantas son lixiviadas por la lluvia o por erosión, las propiedades químicas de suelos distantes del lugar de introducción se ven afectadas.

Las plantas invasivas también pueden ejercer un profundo impacto indirectamente en la comunidad vegetal debido a los efectos que los herbicidas usados para combatir las pueden ejercer sobre éstas. Ciertos herbicidas pueden producir o reducir nodulación de *Rizobium* y formación de micorrizas.

## **IMPACTOS EN ASPECTOS BIOLÓGICOS**

La invasión de plantas no sólo afecta a los componentes abióticos del ecosistema sino también a los componentes bióticos. Las especies vegetales invasivas afectan la abundancia y variedad de las plantas nativas reduciendo su diversidad y cambiando drásticamente las características propias de la comunidad biológica original presente en ese hábitat. Las plantas invasivas tienen la habilidad de causar variaciones incluso a nivel de los genes de la población de las plantas nativas por hibridación. Este fenómeno ya fue estudiado por la Prof. Vilà durante su estancia postdoctoral en la universidad de Berkeley y publicado en el 2000, indicando que el número creciente de especies de plantas exóticas invasivas en muchas regiones y la alteración continua de ecosistemas naturales por humanos promueven hibridación entre *especies alopátricas*. En este estudio se revisaron los mecanismos y factores que promueven los procesos de hibridación y sus consecuencias negativas en la diversidad biológica. La invasión de plantas por hibridación puede ocurrir mediante cuatro formas diferentes: hibridación entre especies nativas que se han puesto en contacto debido a la alteración del hábitat, hibridación entre una especie exótica y un congéner nativo, hibridación entre dos exóticas y por introducción y consiguiente diseminación del híbrido. El principal efecto genético dañino de estos híbridos en especies nativas es la pérdida tanto de la diversidad genética como de

poblaciones locales adaptadas, así como especies raras y amenazadas. La dispersión de híbridos agresivos puede reducir el crecimiento o reemplazar especies nativas. El éxito y dispersión de híbridos se ve incrementado por la alteración y fragmentación de hábitats, superando barreras naturales y expansiones debido a actividad humana. Además, se ha observado que hay diferencias de comportamiento en floración, polinización y dispersión de semillas entre especies originales e híbridos. *Los especialistas consideran necesario más estudios en la ecología de híbridos invasores y su comparación con la ecología de poblaciones parentales.*

El éxito del establecimiento de especies exóticas está mayormente relacionado con su mejor eficiencia en el uso de recursos que es atribuida a su superior capacidad para competir por los mismos. Esta competencia puede desplazar a las especies nativas y por tanto es de gran importancia en el éxito de la invasión al estar relacionada tanto en las fases de naturalización como de invasión.

Además, se han observado cambios en la estructura de las comunidades edáficas bacterianas y fúngicas a nivel tanto genético como funcional debido a invasión por ciertas plantas invasoras como las anteriormente mencionadas acacias. Estos cambios comienzan a ser detectables en etapas de invasión intermedias, observándose un gradiente de transformación desde zonas no invadidas a zonas muy invadidas. El efecto de estas especies en la estructura de las comunidades microbianas, depende de la especie invasora.

Por otro lado, como la calidad de los restos vegetales varía con la prevalencia de las plantas invasivas, la comunidad microbiana que descompone estos restos también se ve alterada. Aún más, como las especies nativas e invasivas conviven en la misma comunidad, los restos correspondientes también se mezclan. Esta mezcla origina cambios en la calidad y estructura de este recurso lo que en consecuencia origina cambios en la composición de la comunidad microbiana. Es conocido que las bacterias dominan en las primeras etapas siendo reemplazadas posteriormente por los hongos, aunque en los casos donde los restos vegetales son de baja calidad dominan los hongos por requerir menos nutrientes que las bacterias. Así pues, las plantas invasivas interfieren en la cooperación existente entre las redes de microbios del suelo y las plantas nativas que podrían facilitar el éxito de la invasión. La introducción de plantas invasivas altera frecuentemente la relación mutualista entre los hongos y las plantas nativas, especialmente asociaciones micorrízicas. Las plantas invasivas usualmente alteran estas relaciones mutualistas bien por modificación de las vías de alimentación o alterando la dinámica de los nutrientes del suelo o incluso activando patógenos. Es aceptable considerar que los microbios del suelo son considerados uno de los factores clave que incrementan o disminuyen la invasión de plantas, como ha indicado en su discurso la Prof. Vilà refiriéndose a los factores bióticos que influyen en la invasión, por ejemplo de *Hypericum perforatum*.

La comunidad microbiana del suelo juega un papel crítico en la descomposición de los residuos y ciclos de nutrientes mediante la acción de las enzimas. En el suelo las enzimas involucradas en los ciclos del carbón, nitrógeno y fósforo son la B-glucosidasas, proteasas, ureasas y fosfatasa, responsables de la fertilidad y mantenimiento del mismo y cuya actividad se ve alterada cuando este medio se ve invadido por plantas exóticas.

Además, las plantas invasivas no sólo afectan a las plantas nativas y la comunidad microbiana del suelo, sino también a la microfauna e invertebrados del medio invadido, como ha indicado en su discurso la nueva académica.

Hay otros factores que pueden afectar a las comunidades edáficas independientemente de los cambios en la calidad y cantidad de materia orgánica debidos a la invasión. Se ha postulado que la liberación de compuestos *alelopáticos* por acacias podría contribuir de forma significativa a las modificaciones observadas tanto en la vegetación nativa como en los suelos. Además, se ha demostrado que las comunidades edáficas de bosques mixtos, con una vegetación más diversa que los pinares, son más resistentes a la acción de los compuestos alelopáticos. El impacto de los compuestos alelopáticos es más rápido y mayor en las comunidades bacterianas que en las fúngicas, aunque varía con el tipo de suelo. Actualmente los efectos alelopáticos de las especies invasoras en las plantas nativas están ampliamente reconocidos como uno de los factores responsables del éxito de las invasiones en las comunidades vegetales, de tal manera que los exudados de raíces alelopáticos con actividad antimicrobiana que inhiben el crecimiento de plantas nativas y la actividad microbiana de los suelos, están siendo considerados como “nuevas armas” de las plantas. Es, por consiguiente, un proceso de introducción en el suelo de biocidas naturales selectivos. Estos resultados podrían ser al menos una parte de la respuesta a la pregunta que nos hacíamos al principio, sobre si el proceso de invasión del medio por plantas exóticas podría incluirse entre los procesos de contaminación ambiental.

Como se puede deducir del discurso de la Prof. Vilà, sus investigaciones han tenido y tienen unas repercusiones muy relevantes en aspectos medioambientales y socioeconómicos, que afectan al desarrollo y equilibrio de los ecosistemas que nos rodean y esperamos sirvan para concienciar a la sociedad de la fragilidad de nuestro planeta.

Finalmente, espero que mis palabras hayan llevado a su ánimo el convencimiento del acierto de la elección de la nueva académica. Además de una científica de excelencia, la Prof. Vilà, incorpora a la Real Academia Sevillana de Ciencias un espíritu joven, crítico y colaborador en las tareas propias de la institución, como ya ha demostrado en su etapa como académica electa. Sólo me queda felicitar y dar mi más cálida bienvenida a Montserrat Vilà, en mi nombre y en el de mis compañeros de Academia. Agradezco además a todos los asistentes a este acto la atención prestada a mis palabras. He dicho

# ***QUÉ TIENEN DE ESPECIALES LAS FUNCIONES ESPECIALES***

*Discurso de recepción  
como académica de número de la  
Real Academia Sevillana de Ciencias por el  
Ilmo. Sr. D. Antonio J. Durán,  
celebrado el día 1 de junio de 2022*

## **1. INTRODUCCIÓN Y AGRADECIMIENTOS**

Sr. Presidente, señores académicos, queridos amigos, señoras y señores:

Es para mí un honor haber sido elegido para formar parte de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Me siento por ello sinceramente agradecido y ofrezco mi compromiso para colaborar, participar e impulsar las actividades científicas de la Academia en la medida de mis posibilidades.

Quiero empezar mostrando mi agradeciendo a todos aquellos que, de una u otra forma, me han ayudado en mi carrera científica.

En este sentido creo que la mención más importante y especial es para Juan Arias de Reyna, mi indiscutible maestro y miembro de esta Academia. Creo que lo más importante que Juan nos ha dado, a mí y a todos los que nos consideramos alumnos suyos, es un modelo: un modelo de lo que un científico tiene que ser, y, en particular, un modelo de lo que un matemático tiene que ser, lo que incluye saber qué es lo importante y qué lo accesorio en matemáticas. Y también un modelo de comportamiento impecablemente ético. Y eso, en un país donde este tipo de modelos no son precisamente abundantes, es muchísimo.

También debo mencionar a Antonio de Castro, ya desaparecido y miembro fundador de esta Academia, y que dirigía el Departamento de Análisis Matemático cuando me incorporé al mismo hace 37 años.

Y en otro orden de cosas, a Guillermo Curbera, colega, amigo y compañero, y también a Luis Rodríguez Piazza, con quienes inicié mi andadura por la senda de la investigación y la vida de profesor universitario.

Mención también merece el Instituto de Matemáticas de la Universidad de Sevilla, que ayudé a crear y que ha aunado a los investigadores en matemáticas de la Universidad haciendo que el conjunto sea más potente que la suma de sus componentes.

Agradezco al académico Enrique Fernández Cara por contestar a mi discurso, y por los ya muchos y excelentes momentos que hemos pasado juntos, ya sea corriendo esforzadamente, ya reponiéndonos de la carrera con buenas comidas y mejores vinos.

También quiero mostrar mi agradecimiento a todos los investigadores, nacionales y extranjeros, con los que he colaborado, en especial a los profesores Alberto Grünbaum y Christian Berg, por hacerme mejor científico de lo que hubiera sido de no haberlos conocido.

Y en último lugar, que en realidad es el primero, no debe faltar mi más entrañable agradecimiento a mi familia por toda la felicidad y apoyo que me han dado.

En este discurso trataré algunas de las razones por las que yo creo que todavía las Academias, o los académicos tienen un papel que jugar en la sociedad actual; o dicho de otra manera, qué puede la sociedad actual esperar, e incluso demandar, de un académico.

Dado que esta es una academia de ciencias, naturalmente se debe empezar por exigirle a sus miembros cierto nivel de excelencia científica. En este sentido, y como es por otro lado habitual, comentaré algunas de las aportaciones científicas por las que entiendo he sido elegido miembro de esta Academia. Pero procuraré también intercalar algunas otras contribuciones, aparte de la excelencia científica que cabría esperar también de los académicos y que se pueden sintetizar en dos frases: Promoción de la ciencia, por un lado, y Generación de opinión, por otro”.

## **2. FUNCIONES ESPECIALES. BIESPECTRALIDAD**

Así pues, empezaré este discurso hablando del área donde he desarrollado buena parte de mi investigación científica para situar en ella aquellas de mis aportaciones que considero más relevantes.

Esta área responde al nombre genérico de funciones especiales y, dentro de ella, por concretar más, mis mejores resultados los he obtenido en el ámbito de la llamada biespectralidad.

Empecemos por las funciones especiales. Seguro que la audiencia conoce lo que son las raíces cuadradas o cúbicas, las funciones exponenciales, los logaritmos, o las funciones trigonométricas. A estas funciones las llamamos elementales porque, en cierta forma, vienen a resolver problemas elementales del cálculo infinitesimal, lo que, dada la interpretación física de la derivada, es tanto como decir problemas elementales de la dinámica. Sin embargo, la solución explícita de ciertos modelos matemáticos de interés para la física matemática (ya no tan básica, pensemos en modelos mecánico-cuánticos) o la tecnología dependen frecuentemente del uso de otras funciones a las que, para diferenciarlas de las elementales, llamamos funciones especiales. Dicho de otra forma, las funciones especiales permiten aplicaciones concretas de las matemáticas a una infinidad de problemas, ya sea en física matemática, astronomía, o todo tipo de tecnologías (desde el diseño y estudio de estructuras de grandes obras públicas al uso de las modernas tecnologías para el diagnóstico médico por imagen). El profesor Grünbaum, de la Universidad de Berkeley, con el que he colaborado durante bastantes años, acuñó una metáfora muy acertada aunque algo escatológica sobre las funciones especiales: si vemos la ciencia y la tecnología como una gran ciudad, las funciones especiales serían como



las cañerías y el alcantarillado, que contribuyen esencialmente al buen funcionamiento de la ciudad y procuran confort a sus habitantes, por más que se suelen ocultar porque tampoco es raro que su visión pueda resultar ofensiva para los no habituados.

En cuanto a la biespectralidad, su motivación original se encuentra en una serie de trabajos en teoría de la señal, que ya se han convertido en clásicos, realizados en los célebres Laboratorios Bell por C. Shannon, D. Slepian, H. Landau y H. Pollak en los años 60 del siglo XX ([108, 109, 110, 111, 112]). Este tipo de problema que estudiaban en los Laboratorios Bell ha vuelto a aparecer repetidas veces en varios ámbitos de la tecnología; por ejemplo, en el diagnóstico médico usando distintos tipos de tomografía, especialmente la de rayos X. Tienen que ver, por un lado, con el estudio de la optimización entre la dosis de radiación aplicada y la calidad de la imagen obtenida y, por otro lado, con problemas de ángulo limitado en este tipo de exploraciones del cuerpo humano ([107]). El éxito de la investigación de Shannon, Slepian, Landau y Pollak residió en una todavía inexplicada conjunción de milagros matemáticos que se puede describir brevemente del siguiente modo: las funciones especiales que vienen a resolver su problema son autofunciones de dos operadores distintos actuando en distintas variables. Uno de estos operadores relaciona las funciones con el problema de teoría de la señal que querían estudiar en los Laboratorios Bell, y es un operador de tipo integral que hace muy inestable el cálculo explícito de las funciones especiales en cuestión. Por contra, el otro operador implicado, que aparentemente no guardaba relación con el problema, aunque sí con las funciones especiales buscadas, es de tipo diferencial, y a la postre permitió la solución explícita del problema. Al resolver estas funciones un problema espectral con respecto a dos operadores (cada uno actuando en una variable), los profesores Duistermaat y Grünbaum [22] acuñaron posteriormente la denominación *biespectrales* para referirse a este tipo de problemas.

Los problemas biespectrales tienen conexiones muy sorprendentes en bastantes áreas de las matemáticas. Por citar solo algunas, se pueden mencionar el estudio de soluciones racionales de la jerarquía de ecuaciones de Korteweg-De Vries y sus simetrías maestras, anillos conmutativos de operadores diferenciales, deformaciones isomonódrimas de ecuaciones diferencias lineales, álgebras de Weyl, flujos de Toda, etc.

### 3. POLINOMIOS ORTOGONALES CLÁSICOS

Entre las funciones especiales más útiles destacan ciertas familias de polinomios que tienen un carácter biespectral: son los llamados polinomios ortogonales clásicos y clásicos discretos. Dada su ubicuidad en muy diferentes problemas, podemos considerar que estas familias son el caballo de batalla de buena parte de la física matemática clásica, con aplicaciones que van de la teoría del potencial al electromagnetismo, pasando por su aparición estelar en la mecánica cuántica en los trabajos de Schrödinger de los años 20 del siglo XX, donde le aparecieron al físico austríaco al resolver su celebrada ecuación en el caso particular del átomo de hidrógeno.

Podemos describir las familias clásicas de polinomios ortogonales del siguiente modo. Tenemos una sucesión  $(p_n(x))_n$  de polinomios, donde  $x$  indica la variable continua con respecto a la que son funciones y  $n$  una variable discreta que indica el grado del polinomio  $p_n(x)$ . Por un lado, exigimos que estos polinomios sean ortogonales con respecto a una medida  $\mu$  en la recta real:

$$\int_{\mathbb{R}} p_n(x)p_m(x) d\mu(x) = \begin{cases} 0, & m \neq n, \\ a_n \neq 0, & m = n. \end{cases}$$

Para los no habituados, el concepto de ortogonalidad viene a extender el venerable concepto de perpendicularidad que aparece en el teorema de Pitágoras a objetos más generales que los lados de un triángulo.

Esta propiedad analítica de ortogonalidad (asociada al producto escalar propio de un espacio de Hilbert) es equivalente a la siguiente propiedad espectral en la variable discreta  $n$ : existe un operador en diferencias  $T$  de segundo orden actuando en la variable discreta  $n$  del tipo

$$T(f_n) = a_{n+1}f_{n+1} + b_n f_n + c_n f_{n-1},$$

donde  $a_n, b_n, c_n$  son sucesiones de números, tal que

$$T(p_n(x)) = xp_n(x).$$

El resultado anterior es la versión para polinomios ortogonales del teorema espectral y se conoce como teorema de Favard (por más que el resultado ya era conocido para, entre otros, Stieltjes y Chebyshev y apareció explícitamente contenido en el libro de Stone [113], que se publicó un par de años antes que el artículo de Favard [59]).

Las familias clásicas de polinomios ortogonales surgen cuando, además de esta propiedad espectral, exigimos a la familia  $p_n(x)$  que resuelva otro problema espectral, en este caso en la variable continua  $x$ : existe un operador diferencial  $D$  de segundo orden, actuando en la variable continua  $x$ , del tipo

$$D(f(x)) = A_2(x)f''(x) + A_1(x)f'(x) + A_0(x)f(x),$$

donde  $A_2(x), A_1(x)$  y  $A_0(x)$  son funciones de  $x$  independientes de  $n$ , tal que

$$D(p_n(x)) = \lambda_n p_n(x),$$

con  $\lambda_n$  independiente de  $x$  (esto implica, en particular, que las funciones  $A_2, A_1$  y  $A_0$  son polinomios de grado menor o igual que 2, 1 y 0, respectivamente).

Teniendo en cuenta el tipo hipergeométrico de la ecuación diferencial definida por el operador  $D$ , no es difícil adivinar la conexión que tendrán las familias clásicas con algunos problemas físicos muy relevantes.

Las familias clásicas de polinomios ortogonales fueron clasificadas en 1929 por Salomon Bochner [16] (aunque el resultado ya había sido demostrado por E. J. Routh unas décadas antes [103]). Hay solo cuatro familias clásicas, y conforman la aristocracia en el reino de los polinomios ortogonales ([80, 94, 114]). Las medidas de ortogonalidad de las familias clásicas se corresponden con las principales distribuciones continuas de probabilidad (una muestra más de su versatilidad y utilidad).

1. Polinomios de Hermite, ortogonales en  $(-\infty, +\infty)$  con respecto a  $e^{-x^2}$  (distribución normal de probabilidad).
2. Polinomios de Laguerre, ortogonales en  $(0, +\infty)$  con respecto a  $x^\alpha e^{-x}$ ,  $\alpha > -1$  (distribución gamma de probabilidad).
3. Polinomios de Jacobi, ortogonales en  $(-1, 1)$  con respecto a  $(1-x)^\alpha(1+x)^\beta$ ,  $\alpha, \beta > -1$  (distribución beta de probabilidad).
4. Polinomios de Bessel.

Las familias clásicas se construyeron entre finales del siglo XVIII y la primera parte del siglo XIX. La primera en ser estudiada fue el caso  $\alpha = \beta = 0$ : son los llamados polinomios de Legendre, en honor del matemático francés Adrien-Marie Legendre (1752-1833), quien fue el primero en construirlos; aunque el gran C. F. Gauss también hizo estudios pioneros sobre ellos en las primeras décadas del siglo XIX en relación con las fórmulas de cuadratura. Como dije antes, tienen importantes aplicaciones físicas y tecnológicas. La más conocida de ellas las relaciona con los modelos básicos mecano-cuánticos asociados a la ecuación de Schrödinger ([75, 94]); así:

1. Los polinomios de Hermite modelizan las funciones de onda del oscilador armónico unidimensional.
2. Los polinomios de Laguerre modelizan la parte radial de las funciones de onda en el átomo de hidrógeno.
3. El caso  $\alpha = \beta$  de los polinomios de Jacobi, los llamados polinomios ultraesféricos (a partir de los cuales se construyen los esféricos armónicos), modelizan la parte angular de las funciones de onda en el átomo de hidrógeno.

Conviene reseñar que Schrödinger no identificó los polinomios de Laguerre en su primer artículo de 1926 ([105]) donde propuso la ecuación de ondas y la resolvió para el átomo de hidrógeno. Esto lo hizo en su segundo artículo ([106]): allí comentó en una nota a pie de página que había identificado los polinomios de Laguerre como las funciones que, esencialmente, modelizan la parte radial del átomo de hidrógeno, mientras que Erwin Fues (asistente suyo en Zürich) había identificado los polinomios de Hermite como las funciones que, esencialmente, modelizan el oscilador armónico de Planck. Schrödinger también explicó que, a sugerencia de Hermann Weyl y Erwin Fues, consultó el libro

que habían publicado dos años antes Richard Courant y David Hilbert *Methoden der mathematischen Physik* ([19]), donde explícitamente aparece el operador del que son autofunciones los polinomios de Laguerre; esto fue lo que le puso sobre la pista, aunque los polinomios de Laguerre no se mencionan explícitamente en el libro de Courant y Hilbert ([91]).

Habrán advertido que no he dicho con respecto a qué función son ortogonales los polinomios de Bessel. Esta familia es peculiar: fue la última en ser descubierta y estudiada. Aparece en trabajos de mediados del siglo XIX, pero un estudio detallado sobre esta familia no se hizo hasta 1949 por Harry Krall y Orrin Frink ([84]). En ese trabajo mostraron que la medida de ortogonalidad de los polinomios de Bessel no puede ser positiva (como en las otras familias), pero fueron incapaces de encontrar ninguna.

Los polinomios de Bessel tienen también importantes aplicaciones físicas: cuando se considera la ecuación de ondas en coordenadas esféricas, los polinomios de Bessel se pueden usar para encontrar la parte radial de las soluciones ligadas a autovalores enteros no negativos”.

Las matemáticas son una ciencia especial (el filósofo Karl Popper, de hecho, opinaba que ni siquiera son una ciencia). Una de las características más singulares de las matemáticas es su persistencia: todavía hoy enseñamos que hay infinitos números primos, como descubrió Euclides hace 2.300 años, e, igual que entonces, sobre ese resultado se levanta la que Gauss consideraba la reina de las disciplinas matemáticas: la teoría de números. Comparen con lo que ha ocurrido con la astronomía o la física del tiempo de los griegos: la astronomía griega no es más que una interesantísima curiosidad arrumbada en las cunetas de la historia, y posiblemente ni a eso llega la física de simpatías de Aristóteles. La teoría de números, sin embargo, persiste y se sigue estudiando con más ardor todavía del que mostraron los griegos por ella. Es esta persistencia la que justifica una de las varas de medir la calidad de un resultado matemático: cuánto más tiempo lleve planteado, cuantos más y mejores matemáticos se sepa que lo han intentado resolver sin éxito, más calidad matemática cabrá atribuir a quien lo logró resolver (y más placer se sentirá al resolverlo).

El problema de encontrar una función de ortogonalidad para los polinomios de Bessel, una de las familias clásicas de polinomios ortogonales, estuvo abierto durante casi medio siglo, desde que lo propusieran explícitamente Krall y Frink en 1949 ([84]) hasta que yo lo resolví en 1990 ([23]). Desarrollé un método para el cálculo explícito de medidas de ortogonalidad para polinomios ortogonales y usándolo encontré que la siguiente función es una medida de ortogonalidad para los polinomios de Bessel:

$$\phi(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( (2it)^{-1/2} J_1(\sqrt{8it}) \right. \\ \left. \times \int_{-1}^t (\chi_{[-1,0]}(u) - \chi_{[0,1]}(u)) e^{-1/u^2 - 1/(1-u)^2} du \right) e^{-ixt} dt$$

(donde  $J_1$  es la función de Bessel de primer orden).

Naturalmente, ese casi medio siglo que se llevó planteado ese importante problema sobre los polinomios de Bessel sin que nadie diera con la solución a mí me supo a gloria. Resolver un problema central para una de las aristocráticas familias de polinomios clásicos fue una de mis mejores experiencias como investigador. Se dio además la circunstancia de que lo resolví en Sicilia (la tierra que vio nacer a Arquímedes) cuando participaba en mi primer congreso internacional sobre funciones especiales. Hubo otra circunstancia que hizo de ese congreso algo inolvidable para mí. Richard Askey, por entonces el gran gurú mundial de las funciones especiales, propuso un problema que consideraba en ese momento, 1990, entre los más importantes que debían resolverse dentro del campo de las funciones especiales y la biespectralidad. Tenía en este caso que ver con otras aristocráticas familias de polinomios ortogonales: las llamadas familias clásicas discretas. Volveré dentro de un momento sobre el problema propuesto por Askey, porque ahora tengo que presentar brevemente las familias clásicas discretas.

#### 4. POLINOMIOS DE KRALL DISCRETOS

Las familias clásicas de polinomios ortogonales tienen una versión discreta, donde los operadores diferenciales de segundo orden (que actúan en la variable continua  $x$ ) se sustituyen por operadores en diferencias también de segundo orden (también actuando en la variable continua  $x$ ). En este caso existen cuatro familias de polinomios ortogonales clásicos discretos que van ligadas con las cuatro principales distribuciones de probabilidad discreta ([80, 95]):

1. Los polinomios de Charlier, ortogonales con respecto a la distribución de Poisson

$$\sum_{x=0}^{\infty} \frac{a^x}{x!} \delta_x, \quad a > 0.$$

2. Los polinomios de Meixner, ortogonales con respecto a la distribución de Pascal.
3. Los polinomios de Krawtchouk, ortogonales con respecto a la distribución binomial.
4. Los polinomios de Hahn, ortogonales con respecto a la distribución hipergeométrica.

Aunque construidas entre finales del siglo XIX y las primeras décadas del XX, la clasificación la obtuvo Otis E. Lancaster en 1941 ([88]).

Los polinomios clásicos discretos aparecen también en numerosas aplicaciones en estadística y probabilidad, física matemática y otras disciplinas. Por citar solo un ejemplo, los polinomios de Krawtchouk modelizan el sistema de urnas de los Ehrenfest ([2, 58, 76]), propuesto por Paul y Tatiana Ehrenfest para resolver la dicotomía entre irreversibilidad y recurrencia que enfrentó a finales del siglo XIX el segundo principio de la termodinámica con el teorema de recurrencia de Poincaré; aparecen también en

el problema, relacionado con el anterior, del movimiento browniano de una partícula elásticamente ligada al origen, estudiado por Erwin Schrödinger y Friedrich Kohlrausch en la década de los 20 del siglo XX ([81]).

Desde los años cuarenta del siglo XX, las familias clásicas y clásicas discretas de polinomios ortogonales se han enriquecido con los llamados polinomios de Krall. Los polinomios de Krall son familias de polinomios ortogonales que resuelven un problema biespectral asociado a un operador diferencial o en diferencias de orden mayor que dos; recuerdo que el orden dos corresponde con el caso clásico. Harry Krall demostró en 1940 que el orden de estos operadores diferenciales tiene necesariamente que ser par y clasificó el caso de operadores de orden cuatro ([82, 83]). Sin embargo, hubo que esperar hasta la década de los ochenta del siglo XX para encontrar familias de Krall asociadas a operadores diferenciales de cualquier orden par. Todas ellas corresponden a modificaciones de las familias clásicas de Laguerre y Jacobi (no se conocen polinomios de Krall asociados a la familia de Hermite), aunque todavía no está demostrado que las familias de polinomios de Krall hasta ahora construidas sean todas las posibles. Las modificaciones consisten en imponer a (uno o todos) los parámetros de las familias clásicas que sean enteros no negativos y añadir deltas de Dirac en los extremos del intervalo de ortogonalidad (hay una extensísima bibliografía sobre el tema, de la que se pueden destacar [67, 68, 72, 73, 74, 77, 78, 79, 87, 89, 90, 118]).

Vuelvo ahora al congreso de Sicilia de 1990. Fue en ese congreso donde se presentaron por primera vez polinomios de Krall asociados a operadores diferenciales de orden par arbitrario. Sin embargo, en ese momento nada se sabía del caso Krall discreto: esto es, polinomios ortogonales que son autofunciones de operadores en diferencias de orden mayor que dos. Precisamente en ese congreso en 1990, Richard Askey (como apunté antes, el gran gurú de las funciones especiales a nivel mundial) propuso como uno de los más importantes problemas del área el encontrar ejemplos de polinomios de Krall discretos. Naturalmente hubo bastantes intentos de resolver el problema en los años siguientes, aunque todos con resultados negativos que venían a mostrar que los métodos para el caso de operadores diferenciales no funcionan en el caso discreto (ver, por ejemplo, [3, 4]). Nadie lograba imaginar qué tipo de modificaciones había que usar en el caso de las familias discretas. En 2011 logré construir los primeros ejemplos de polinomios de Krall discretos, setenta años después de que Harry Krall construyera sus ejemplos para el caso de operadores diferenciales y más de veinte años después de que Richard Askey propusiera el problema como uno de los más relevantes del área de las funciones especiales.

Cuando construí los primeros ejemplos, propuse la conjetura de cómo se podía construir toda una jerarquía de familias de Krall discretas partiendo de las familias clásicas discretas ([31]): cada familia clásica discreta tiene asociada una familia de polinomios de forma que las medidas obtenidas al multiplicar uno de estos polinomios por el peso clásico discreto generan medidas de Krall discretas. Por ejemplo, para el caso más sencillo de los polinomios de Charlier, la forma de construir familias de Krall-Charlier consiste en multiplicar el peso de Charlier por un polinomios cuyos ceros sean números enteros positivos: dado un conjunto finito de números enteros positivos  $F$ , los polinomios ortogonales con respecto a la medida discreta

$$\sum_{x=0}^{\infty} \prod_{f \in F} (x - f) \frac{a^x}{x!} \delta_x, \quad a > 0,$$

son autofunciones de un operador en diferencias de orden

$$\sum_{f \in F} f - \binom{n_F+1}{2}$$

(donde  $n_F$  denota el número de elementos de  $F$ ).

Demostrar estas conjeturas ha llevado (a mí y a un grupo de colaboradores) casi una década en la que ha habido que desarrollar conceptos y herramientas nuevas, dadas las enormes diferencias con el caso continuo ([32, 37, 45, 46]). Estas técnicas se han mostrado muy fructíferas para tratar todo tipo de problemas biespectrales ([1, 37, 42, 47, 48]). Aunque todavía no está demostrado que estas sean todas las familias de Krall discretas, no se ha encontrado ninguna distinta de las que aparecen en mis conjeturas o de casos límite de estas ([40]).

El estudio de las familias de Krall discretas ha mostrado una gran riqueza de estructura, así como sorprendentes conexiones con otros problemas matemáticos y de física matemática. Por citar solo dos ejemplos:

1. Obtención de identidades de tipo Selberg y problemas combinatorios relacionados (identidades para el término constante en desarrollos de funciones analíticas de varias variables, etc.) ([20, 35, 36, 41, 42, 62]).
2. Hasta donde yo sé, los polinomios de Krall no aparecen en aplicaciones físicas (lo que tampoco es extraño dado que satisfacen ecuaciones diferenciales de orden mayor que dos). Sin embargo, la construcción de los polinomios de Krall discretos ha tenido una inesperada aplicación en física matemática: se pueden usar para construir los llamados polinomios excepcionales. Los polinomios excepcionales son un nuevo tipo de funciones especiales que se han empezado a construir en la física matemática en los últimos 15 años y que sirven para integrar de forma exacta la ecuación de Schrödinger asociada a perturbaciones racionales de los potenciales clásicos (tanto del oscilador armónico unidimensional como del átomo de hidrógeno) (a pesar de su novedad, la bibliografía sobre polinomios excepcionales es ya muy extensa, aquí destacaré los siguientes artículos: [33, 34, 38, 39, 57, 60, 61, 63, 64, 66, 92, 97, 98, 100, 104]). Los polinomios excepcionales han sido aplicados en varios problemas mecánico-cuánticos relacionados con potenciales shape-invariant ([100]), transformaciones supersimétricas ([65]), modelos discretos [96], mass-dependent potentials ([92]) y resolubilidad quasi-exacta ([115]).

## 5. INTERMEDIO

Como comenté al principio, voy a dedicar una parte de este discurso a exponer algunas razones por las que yo creo que todavía los académicos tenemos un papel relevante que jugar en la sociedad actual.

Están lejos ya los tiempos en que el espacio de las Academias fue fundamental para hacer ciencia. Me refiero a los tiempos heroicos de los siglos XVII y, sobre todo, del XVIII, donde los mejores matemáticos y científicos hacían ciencia en las Academias y no en unas Universidades mayormente anquilosadas y alejadas del empuje científico del momento. Baste citar el caso paradigmático de Leonhard Euler, que desarrolló toda su prolífica carrera científica en las Academias de Berlín y San Petersburgo. Las Academias ya no son imprescindibles hoy como espacio para hacer ciencia pero, a mi modo de ver, deben ser tribunas desde donde, por un lado, se promueva la ciencia y, por otro, se haga oír la voz de la ciencia en todos aquellos asuntos donde se requiera. En otras palabras: por un lado, el académico debe esforzarse en hacer presente y transmitir la ciencia a la sociedad, en hacer divulgación de la ciencia; por otro, debe participar con opinión cualificada en aquellos debates donde sea necesaria la visión y la opinión de los científicos y convertirse así en generadores de opinión científica.

Desarrollaré más estas ideas y, a la vez, comentaré algo de mi experiencia particular en ambas.

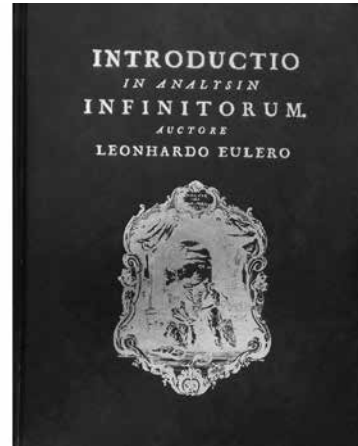
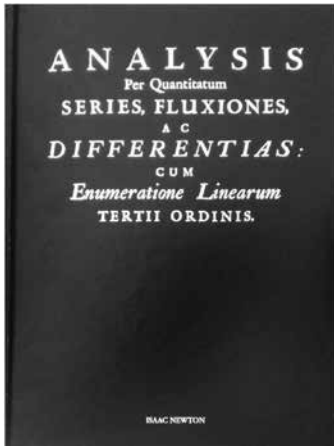
Debo empezar diciendo que no descubro nada nuevo, porque esta Academia ya hace difusión de la ciencia a través de los varios coloquios, jornadas y conferencias que organiza (sola o en colaboración con entidades como la Fundación Cajazol y el Ateneo de Sevilla); y tampoco son pocas las ocasiones en que los académicos hacen oír su opinión a través de tribunas públicas (como pueden ser, por ejemplo, las columnas de opinión publicadas por algunos de sus miembros en el *Diario de Sevilla*). Así que reitero aquí mi compromiso específico para colaborar y participar en estas actividades de difusión y opinión.

En el sentido divulgativo debemos difundir y dar a conocer la ciencia a la sociedad. Tanto los hallazgos recientes en la frontera del conocimiento que la ciencia continuamente está produciendo y qué implicaciones pueden tener para la sociedad, como los aspectos del pasado que hacen de la historia de la ciencia una disciplina ciertamente apasionante. En los avatares de los descubrimientos científicos a lo largo del tiempo, se mezclan elementos que dotan a su historia de una notable capacidad para atraer la atención de la sociedad: abundan en la historia de la ciencia las sorpresas espectaculares, los cambios de guión sorprendentes, y está poblada de personajes fascinantes y conmovedores. No debemos desaprovechar este tesoro para captar el interés del público e interesarlo por la ciencia. En mi caso, he dedicado mucho tiempo y esfuerzo a la divulgación de la ciencia, en general, y de las matemáticas en particular. Y me siento especialmente orgulloso de mis aportaciones, a pesar de que durante un tiempo casi se consideraba un demérito para un científico en activo dedicar esfuerzos a la divulgación. En este sentido, he publicado más de una docena de libros, la mayoría en prestigiosas editoriales comerciales, que abarcan desde los estudios puramente históricos, al ensayo



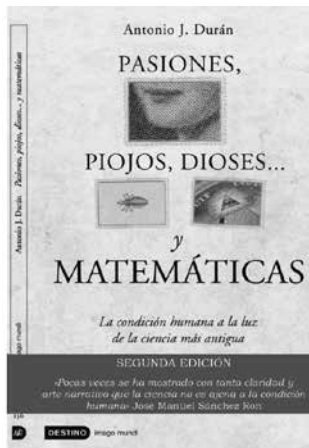
y la divulgación. Algunos de mis libros han sido traducidos al francés, inglés, italiano, polaco, portugués y ruso. Ilustraré con un ejemplo cada una de estas facetas.

1. Entre los estudios históricos destacaría la colección de obras maestras de las matemáticas que dirijo para la Real Sociedad Matemática Española (y en la que han participado también otras instituciones, como la Sociedad Thales o Patrimonio Nacional): en esa colección he prologado y anotado la traducción al castellano, por primera vez en la historia, de obras tan fundamentales como el *Análisis de cantidades mediante series, fluxiones y diferencias* de Isaac Newton o la *Introducción al análisis de los infinitos* de Leonhard Euler. En ambos casos, se trata de la primera vez que se han traducido al castellano. También he prologado en esta colección Obras escogidas de Arquímedes.

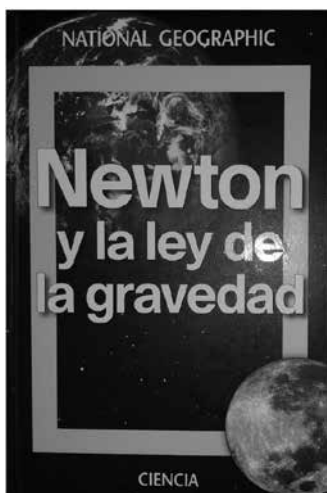


2. En mis libros de ensayo he explorado lo que he dado en llamar circunstancias emocionales de la ciencia. Por circunstancias de un teorema, por ejemplo, me refiero a los entresijos históricos en que se desarrollaron el autor, o los autores, de ese teorema, ya fuera la persona que lo conjeturó, aquella que lo demostró o lo refutó, o aquellas otras que intentaron una cosa u otra sin éxito, si alguna hubo. Entiendo que las circunstancias emocionales de la ciencia son, en cierta forma, similares a las circunstancias que describió Ortega y Gasset como compañeras inseparables para entender el yo. Esas circunstancias emocionales de la ciencia tienen mucho que ver con la historia de la ciencia, pero, tal y como yo lo entiendo, no son la misma cosa. El enfoque de mis libros de ensayo está hecho desde el convencimiento de que la confrontación del mundo racional y aparentemente frío de la ciencia, en especial del mundo abstracto de las matemáticas, con el mundo vehemente y emocional de los científicos se desprende una luz que puede ayudar a alumbrar las más recónditas profundidades de la naturaleza humana. Con ese enfoque más humanista, rico y complejo no solo se ayuda al lector a comprender mejor lo científico sino también la propia condición humana. Según me han

hecho llegar numerosos lectores, ese enfoque dota a mis libros de ensayo de una característica propia muy personal. Es el caso, por ejemplo, de los titulados *Pasiones, piojos, dioses... y matemáticas*, que lleva como subtítulo *La condición humana a la luz de la ciencia más antigua*, publicado por la Editorial Destino en 2009, y *El universo sobre nosotros*, una historia de la astronomía que lleva como subtítulo *Un periplo fascinante desde el cielo de don Quijote al cosmos de Einstein*, publicado por la Editorial Crítica en 2015.



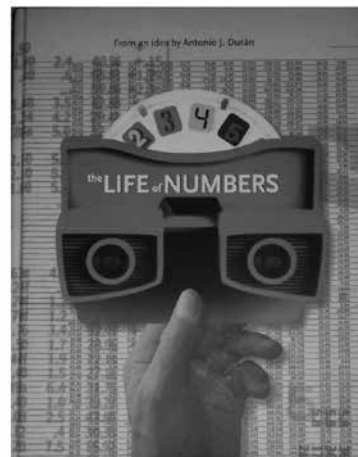
3. También he escrito libros pensados para una divulgación más amplia, incluso libros de gran distribución integrados en colecciones ofrecidas por periódicos de prestigio (*El País*, por ejemplo) en quioscos; aquí me permitiré citar la biografía de Isaac Newton, *Newton y la ley de la gravedad* (2012), que escribí para la Editorial RBA, y que también apareció en una colección de biografías científicas de National Geographic.



4. También querría mencionar las dos exposiciones de las que he sido comisario, cuyo objetivo fue ofrecer al gran público exposiciones de tema científico en espacios habitualmente dedicadas a exposiciones de tipo artístico, religioso o histórico.
- a) La primera de estas exposiciones tuvo por motivo la celebración del año 2000 como Año Mundial de las Matemáticas. La exposición se tituló *El legado de las matemáticas: de Euclides a Newton, los genios a través de sus libros*, estuvo bajo el amparo de la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía y tuvo lugar en el Salón de Tapices de los Reales Alcázares de Sevilla en las navidades del año 2000 (créanme, no fue fácil convencer al Ayuntamiento de Sevilla de que cediera un espacio tan señero como el Salón de Tapices de los Alcázares para una exposición que no era ni sobre Semana Santa ni sobre reyes conquistadores). La exposición contó con manuscritos y ediciones impresas de todos los grandes clásicos de las matemáticas y la astronomía desde los griegos al siglo XVII, puestos en sazón con otras obras esenciales de la cultura, incluyendo un ejemplar de la Biblia de Gutenberg. La exposición se podía también disfrutar como una muestra de la evolución del libro, desde los manuscritos medievales hasta joyas producidas por los mejores impresores europeos del siglo XVI pasando por una impresionante colección de incunables entre los que destacaba la Biblia de Gutenberg. Los 50.000 visitantes recibidos en las tres semanas que estuvo abierta dan idea del interés con que fue recibida.



- b) La otra exposición tuvo lugar en la Biblioteca Nacional en Madrid entre junio y septiembre de 2006, coincidiendo con la celebración del *International Congress of Mathematicians* en una ciudad española, por primera vez en la historia. La exposición se tituló *Vida de los números*, y trató sobre los números, un hecho científico fundamental, usando como escenario la Biblioteca Nacional, la casa de las letras. Se usaron, además, elementos del mundo de la cultura, como tablillas babilónicas, monedas y téseras romanas, manuscritos prerrománicos y mayas, incunables, grabados de Leonardo da Vinci y Dure-ro, diseños tipográficos o mapas (terrestres y celestes). Hubo algunas colas, algo que, según los responsables de la Biblioteca Nacional, no siempre ocurre con las exposiciones allí organizadas. Además, el catálogo de la exposición fue Premio Nacional del Ministerio de Cultura al libro de divulgación mejor editado de 2006.



Otra de las actividades que los académicos debemos realizar es la de convertirnos en generadores de opinión científica especialmente en aquellos debates donde sea necesaria la visión y la opinión cualificada de los científicos. Téngase en cuenta que las sociedades actuales tienen gran dependencia de la ciencia y la tecnología, y por tanto no son pocas las ocasiones en que hará falta ofrecer nuestra opinión sobre problemas y cuestiones que tengan que ver, directa o indirectamente, con la ciencia y la tecnología. He aquí tres relevantes ejemplos de estas situaciones (de muchos posibles): el cambio climático, la inteligencia artificial (algoritmos) y, naturalmente, la pandemia generada por el coronavirus. En todas ellas, por cierto, las matemáticas tienen un importante papel que jugar. En todos ellos, las Academias tienen que hacer el necesario esfuerzo para llevar a la sociedad opinión cualificada que ayude a clarificar situaciones, enmendar errores o falsas creencias, combatir la desinformación (en muchas ocasiones, interesada) e influir de una u otra manera, ya sea en la toma de decisiones políticas ya en la modulación de los comportamientos sociales. En este sentido, quiero compartir con ustedes la labor de información que desde el Blog del Instituto de Matemáticas de la Universidad de Sevilla,

que me honro en haber puesto en marcha y dirigir, hemos realizado tratando de arrojar algo de luz y perspectiva sobre la situación provocada por la epidemia del coronavirus. Para ello, hemos aplicado a los distintos factores del problema enfoques diversos donde las matemáticas, en una u otra forma, pueden ayudar. Debo empezar comentando que el Blog del IMUS, que cuenta ya con cinco años de vida, explora las conexiones de las matemáticas con otros ámbitos de la ciencia, la tecnología, el pensamiento, la cultura, la economía, la sociedad y cualquier otra actividad humana. Tiene pues un carácter multidisciplinar, innovador y heterodoxo, que conjuga la divulgación para público general con entradas de muy alto nivel y actualidad científica. Desde el Blog del IMUS trabajamos con la certeza de que la difusión de las matemáticas implica explorar su conexión con cualesquiera otros ámbitos de la ciencia, la tecnología, las humanidades o la cultura, todo lo cual permite un mayor nivel de profundidad en la comprensión, tanto del valor intrínseco de las matemáticas, como del que supone en todos aquellos ámbitos donde se aplica o con los que se relaciona. En cuanto a la pandemia, debo reseñar que el Blog del IMUS ha tenido una repercusión mediática que cabe calificar de extraordinaria. Esto ha sido así porque fuimos pioneros en advertir que los datos disponibles en las primeras semanas de marzo de 2020, justo cuando estalló la pandemia, eran muy defectuosos, y confundían más que aclaraban la situación de la pandemia. También apuntamos algunas ideas de cómo se podía estimar en aquellos momentos la dimensión real de la pandemia. Esto hizo que muchos medios buscaran algo de claridad en el Blog. Así, Javier Sampedro dedicó su columna de *El País* del 27 de marzo de 2020 (que inequívocamente tituló *Los datos están mal*) a la entrada del Blog del IMUS *¿Cómo estimar el número de infectados reales por covid-19? Los casos de Andalucía e Italia* que yo había publicado en el Blog el 23 de marzo, <https://elpais.com/ciencia/2020-03-26/los-datos-estan-mal.html>. Esa y otras entradas fueron también referenciadas en muchos otros medios de comunicación: *La Razón*, *ABC*, *El Diario* o *Diario de Sevilla*, entre otros periódicos, y dieron origen a numerosas entrevistas en programas nacionales de máxima audiencia, entre los que cabe destacar *La brújula* de *Onda Cero*, *A vivir que son dos días* de *La Cadena Ser*, *24 horas* de *Radio Nacional de España*, o *La mañana de Andalucía* de *Canal Sur*.

## 6. BIESPECTRALIDAD MATRICIAL

En la parte final de mi discurso, haré referencia a dos problemas más donde he hecho contribuciones relevantes, en este caso en colaboración con dos prestigiosos matemáticos, que han acabado siendo también grandes amigos: los profesores Alberto Grünbaum, de la Universidad de Berkeley, y Christian Berg, de la Universidad de Copenhague.

Cuando, en la década de los 40 del siglo XX, el matemático soviético Mark Krein ([85, 86]) propuso estudiar polinomios ortogonales a valores matriciales, surgió inmediatamente el problema de encontrar las familias biespectrales en este tipo de contexto. Más concretamente, el problema de encontrar familias de polinomios ortogonales a valores matriciales que fueran autofunciones de operadores diferenciales de segundo orden con coeficientes matriciales.

En 1997 ([27]), yo había publicado un artículo inicial sobre este problema que había llamado la atención del profesor Grünbaum, de la Universidad de Berkeley. En ese momento, el Prof. Grünbaum formaba parte del *Committee on the Mathematics and Physics of emerging dynamic biomedical imaging*, un Comité integrado en el *National Research Council* y el *Institute of Medicine* de Estados Unidos. Este era un Comité multidisciplinar para documentar los desafíos clave en matemáticas y física que podían ayudar al desarrollo de aparatos pioneros para el diagnóstico por imagen en biomedicina. Allí coincidió, entre otros, con Paul C. Lauterbur, en ese momento una autoridad mundial en resonancia magnética, ganador del Premio Nobel de Medicina en 2003 por sus descubrimientos en imagen por resonancia magnética. El Prof. Grünbaum, con una sólida formación de matemático aplicado adquirida en el Courant Institute de la Universidad de Nueva York, donde realizó su tesis doctoral, había publicado, junto con algunos colaboradores, un artículo en *Science* en 1990 sobre reconstrucción de imágenes internas de cuerpos que dispersan la radiación; lo allí estudiado, junto con las discusiones del Comité, llevaron al Prof. Grünbaum a pensar que los polinomios ortogonales biespectrales a valores matriciales podían ser una herramienta útil en tomografía tensorial (que permite una mejor exploración de cuerpos anisotrópicos). Por esos años, yo había centrado mi investigación en la ortogonalidad matricial y había publicado algunos artículos sobre el tema que tuvieron bastante repercusión en el área. Entre ellos el inicial sobre biespectralidad matricial que apareció en 1997, ya comentado. A raíz de ese artículo, el Prof. Grünbaum me propuso una colaboración para encontrar ejemplos de polinomios ortogonales matriciales biespectrales.

El problema de encontrar ejemplos no triviales (esto es, que no se reduzcan a matrices diagonales con polinomios clásicos en la diagonal) de este tipo de funciones especiales es de una naturaleza matemática incomparablemente más complicada que el caso clásico escalar, dado que equivale a resolver explícitamente un sistema de ecuaciones diferenciales que no se puede desacoplar, con condiciones adicionales de hermiticidad difíciles de manejar (aquí la condición de resolver *explícitamente* es fundamental). Más concretamente, se trata de encontrar funciones matriciales hermíticas  $W(t)$ , y polinomios matriciales  $A_2$ ,  $A_1$  y  $A_0$  con  $\text{grado}(A_i) \leq i$ , verificando

$$\begin{aligned} A_2 W &= W A_2^*, \\ 2(A_2 W)' &= W A_1^* + A_1 W, \\ (A_2 W)'' - (A_1 W)' + A_0 W &= W A_0^* \end{aligned}$$

(además de ciertas condiciones de frontera).

Como se puede ver, la cuestión de la no conmutatividad del producto de matrices aparece de forma explícita en las ecuaciones anteriores y supone una complicación considerable para la resolución de este tipo de problemas. El primer fruto de mi colaboración científica con el Prof. Grünbaum fue un artículo, aparecido en 2004, donde desarrollamos técnicas muy potentes y novedosas que nos permitieron integrar explícitamente las ecuaciones anteriores, suponiendo que el polinomio  $A_2$  es escalar y para

algunos casos de polinomios matriciales  $A_1$  y  $A_0$  ([49]). Para comparar la diferencia con el caso escalar, baste decir que los ejemplos que encontramos los construimos a partir de polinomios a los que podemos calificar de puramente matriciales, puesto que tienen unas características imposibles para un polinomio escalar (v.g., son polinomios  $P$  no constantes pero cuyo determinante es constante igual a 1:  $\det P(x) = 1$ , lo que implica en particular que  $P$  tiene inversa  $P^{-1}$  que vuelve a ser un polinomio matricial).

La colaboración con el Prof. Grünbaum ha sido muy fructífera, y hemos publicado juntos bastantes artículos sobre biespectralidad matricial ([49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56]), incluyendo eventuales aplicaciones en modelos cuánticos relativistas ([54]).

Entre otras cosas, los resultados que se obtuvieron en esos años (véanse, entre muchos otros, [24, 25, 26, 28, 29, 30, 43, 44, 69, 99]) muestran que la no conmutatividad del producto de matrices y la existencia de matrices singulares (las diferencias de la estructura algebraica de las matrices con respecto a los números complejos) implican una mucha mayor flexibilidad de la ortogonalidad matricial respecto del problema biespectral; lo que se traduce en la existencia de una increíble riqueza y complejidad de ejemplos biespectrales matriciales. Frente a las cuatro únicas familias clásicas del caso escalar, el caso matricial muestra una inabarcable riqueza que apenas ha podido ser entrevista dada la intrínseca dificultad del problema de encontrar estas familias clásicas matriciales. En matemáticas, casi tan importante como resolver problemas es proponer problemas interesantes y profundos, que sirvan tanto para revitalizar áreas ya existentes como para crear áreas nuevas de investigación. Este es el caso de la biespectralidad matricial, donde ya hay algunos problemas difíciles y profundos que han atraído la atención de los investigadores del área:

1. Quizá el más relevante sea el problema de clasificar los polinomios matriciales biespectrales. Dada la riqueza y variedad de ejemplos ya comentada, lo primero es dar con la clave para hacer la clasificación, lo que situá al problema en una dimensión muy distinta de la clasificación de Bochner para las familias clásicas escalares.
2. Otro problema nuevo es el del estudio de las álgebras de operadores diferenciales asociadas a las familias de polinomios ortogonales matriciales biespectrales. En el caso escalar, esa caracterización es relativamente fácil de obtener y las álgebras resultantes tienen una estructura trivial, en el sentido de que están generadas por el operador de segundo orden asociado a cada familia clásica. Esto dista de ser cierto en el caso matricial, y ya hay un buen número de conjeturas (de las que solo se han podido demostrar las relativas a los ejemplos más sencillos en tamaño  $2 \times 2$ ) que muestran gran riqueza de patrones, lo que viene a señalar que en el caso matricial las álgebras de operadores van a tener una gran variedad de estructuras.
3. Son numerosas las aplicaciones que cabe esperar de las familias biespectrales matriciales. Entre ellas se pueden mencionar: (a) en tomografía tensorial, donde se ha mostrado la existencia de soluciones a problemas de ángulo limitado asociados al núcleo reproductor de algunas de estas familias (en la línea de los

trabajos seminales de Shannon, Slepian, Landau y Pollack en los Laboratorios Bell mencionados al inicio de este discurso); (b) en física cuántica relativista en relación con la ecuación de Dirac y la representaciones del grupo de Schrödinger; (c) en la modelización de cadenas discretas de Markov donde las interacciones no se reducen a los vecinos más próximos.

(de la ya muy extensa bibliografía que muestra el interés por estos problemas, destacaré [17, 18, 21, 70, 71, 116, 117, 119]).

## 7. PROBLEMAS DE MOMENTOS

La última contribución que quería comentar la hice con el profesor Christian Berg de la Universidad de Copenhague. El profesor Berg es el mayor experto mundial en problemas de momentos. Estos problemas consisten en determinar relaciones y propiedades entre una medida  $\mu$  y las integrales

$$\int_{\mathbb{R}} x^n d\mu, \quad n \in \mathbb{N},$$

que se denominan momentos de  $\mu$ , debido a que el caso  $n = 2$  es conocido como momento de inercia si entendemos  $\mu$  como una distribución de masas, y el caso  $n = 1$  como momento estático.

La teoría de momentos está íntimamente relacionada con la de polinomios ortogonales al venir el producto escalar que define la ortogonalidad determinado por los momentos de la medida. También tiene múltiples aplicaciones en probabilidad.

La contribución del Prof. Berg y mía tiene un sabor muy clásico y viene a completar un problema que fue tratado en los años 20 del siglo XX por matemáticos de la talla de Rolf Nevalinna y Marcel Riesz ([93, 101, 102]). Dada una familia de polinomios ortonormales  $(p_n)_n$ , Nevalinna y Riesz caracterizaron los números complejos  $z$  para los que la sucesión  $(p_n(z))_n$  está en el espacio de Hilbert  $l^2$ . La solución depende de cuántas soluciones tiene el problema de momentos asociado a la medida de ortogonalidad de los polinomios  $(p_n)_n$ . Si estos tienen una única medida  $\mu$  con respecto a la que son ortogonales (decimos entonces que el problema de momentos asociado es determinado), entonces  $(p_n(z))_n \in l^2$  si y solo si  $\mu(\{z\}) > 0$ . Si hay varias medidas con respecto a la que son ortogonales (decimos entonces que el problema de momentos asociado es indeterminado), entonces  $(p_n(z))_n \in l^2$  para todo número complejo  $z$  (esto, además, caracteriza la indeterminación de un problema de momentos).

Dado que el problema es altamente no lineal, quedó pendiente el estudio de cuándo una combinación finita de evaluaciones, por ejemplo,  $(p_n(z_1) + p_n(z_2))_n$  está en  $l^2$ . El profesor Berg y yo resolvimos completamente el problema en una serie de artículos ([5, 6, 7, 8]) incluyendo el caso más general que incluye también evaluación de una combinación de derivadas de cualquier orden de la familia de polinomios ortogonales:



$$\sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^{L_k} a_{k,l} p_n^{(l)}(z_k),$$

donde tanto  $a_{\{k,l\}}$  como  $z_k$  son números complejos.

Me interesé por este problema en 1992, e intuí que su resolución iba a venir determinada por el concepto de índice de determinación, que el Prof. Berg y su colaborador M. Thill habían introducido en un artículo sobre problemas de momentos en varias variables publicado en 1991 en la revista *Acta Mathematica* ([15]). Propuse entonces al Prof. Berg estudiar juntos el problema, y dimos así inicio a una muy fructífera relación científica y personal (concretada en un buen número de colaboraciones [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]).

## REFERENCIAS

- [1] R. ÁLVAREZ-NODARSE Y A. J. DURÁN, Using  $D$ -operators to construct orthogonal polynomials satisfying higher-order  $q$ -difference equations, *J. Math. Anal. Appl.* **424** (2015), 304-320.
- [2] R. ASKEY, Evaluation of some determinants, ISAAC Congress, 2003.
- [3] H. BAVINCK Y H. VAN HAERINGEN, Difference equations for generalizations of Meixner polynomials, *J. Math. Anal. Appl.* **184** (1994), 453-463.
- [4] H. BAVINCK Y R. KOEKOEK, On a difference equation for generalizations of Charlier polynomials, *J. Approx. Theory* **81** (1995), 195-206.
- [5] C. BERG Y A. J. DURÁN, The index of determinacy for measures and the  $L_2$  norm of orthonormal polynomials, *Trans. Amer. Math. Soc.* **347** (1995), 2795-2811.
- [6] C. BERG Y A. J. DURÁN, When does a discrete differential perturbation of a sequence of orthonormal polynomials belong to  $l_2$ ?, *J. Funct. Anal.* **136** (1996), 127-153.
- [7] C. BERG Y A. J. DURÁN, Orthogonal polynomials,  $L_2$  spaces and entire functions, *Math. Scand.* **79** (1996), 209-223.
- [8] C. BERG Y A. J. DURÁN, Measures with finite index of determinacy or a mathematical model for Dr. Jekyll and Mr. Hyde, *Proc. Amer. Math. Soc.* **125** (1997), 523-530.
- [9] C. BERG Y A. J. DURÁN, A transformation from Hausdorff to Stieltjes moment sequences, *Ark. Mat.* **42** (2004), 239-257.
- [10] C. BERG Y A. J. DURÁN, Some transformations of Hausdorff moment sequences and Harmonic numbers, *Canad. J. Math.* **57** (2005), 941-960.
- [11] C. BERG Y A. J. DURÁN, Analytic functions associated to positive definite infinite matrices, *J. Math. Anal. Appl.* **315** (2006), 54-67.
- [12] C. BERG Y A. J. DURÁN, The fixed point for a transformation of Hausdorff moment sequences and iteration of a rational function, *Math. Scand.* **103** (2008), 11-39.
- [13] C. BERG Y A. J. DURÁN, Iteration of the rational function  $z-1/z$  and a Hausdorff moment sequence, *Expo. Math.* **26** (2008), 375-385.
- [14] C. BERG Y A. J. DURÁN, Fibonacci numbers, Euler two periodic continuous fractions and moment sequences, *Fibonacci Quart.* **49** (2011), 66-75.
- [15] C. BERG Y M. THILL, Rotation invariant moment problems, *Acta Math.* **167** (1991), 207-227.
- [16] S. BOCHNER, Über Surm-Liouvillesche polynomsystema, *Math. Z.* **29** (1929), 730-736.
- [17] W. R. CASPER Y M. YAKIMOV, The matrix Bochner problem, *American J. Math.*, por aparecer.

- [18] M. M. CASTRO Y F. A. GRÜNBAUM, The algebra of differential operators associated to a given family of matrix valued orthogonal polynomials: five instructive examples, *Int. Math. Res. Not.* **2006** (2006), Art. ID 47602, 33 pp.
- [19] R. COURANT Y D. HILBERT, *Methoden der Mathematischen Physik*, vol. 1., Springer, Berlin, 1924.
- [20] G. CURBERA Y A. J. DURÁN, Invariant properties for Wronskian type determinants of classical and classical discrete orthogonal polynomials under an involution of sets of positive integers, *J. Math. Anal. Appl.* **474** (2019), 748-764.
- [21] M. D. DE LA IGLESIA Y C. JUAREZ, The spectral matrices associated with the stochastic Darboux transformations of random walks on the integers, *J. Approx. Theory* **258** (2020), 105458, 32 pp.
- [22] J. J. DUISTERMAAT Y F. A. GRÜNBAUM, Differential equations in the spectral parameter, *Comm. Math. Phys.* **103** (1986), 177-240.
- [23] A. J. DURÁN, Functions with given moments and weight functions for orthogonal polynomials, *Rocky Mountain J. Math.* **23** (1993), 87-104.
- [24] A. J. DURÁN, A generalization of Favard's theorem for polynomials satisfying a recurrence relation, *J. Approx. Theory* **74** (1993), 83-109.
- [25] A. J. Durán, On orthogonal polynomials with respect to a positive defni matrix of measures, *Canad. J. Math.* **47** (1995), 88-112.
- [26] A. J. DURÁN, Markov's theorem for orthogonal matrix polynomials, *Canad. J. Math.* **48** (1996), 1180-1195.
- [27] A. J. DURÁN, Matrix inner product having a matrix symmetric second-order differential operator, *Rocky Mountain J. Math.* **27** (1997), 585-600.
- [28] A. J. DURÁN, Ratio asymptotics for orthogonal matrix polynomials, *J. Approx.Theory* **100** (1999), 304-344.
- [29] A. J. DURÁN, A method to find weight matrices having symmetric second order differential operators with matrix leading coefficients, *Constr. Approx.* **29** (2009), 181-205.
- [30] A. J. DURÁN, Generating orthogonal matrix polynomials satisfying second order differential equations from a trio of triangular matrices, *J. Approx. Theory* **161** (2009), 88-113.
- [31] A. J. DURÁN, Orthogonal polynomials satisfying higher order difference equations, *Constr. Approx.* **36** (2012), 459-486.
- [32] A. J. Durán, Using  $D$ -operators to construct orthogonal polynomials satisfying higher-order difference or differential equations, *J. Approx. Theory* **174** (2013), 10-53.
- [33] A. J. DURÁN, Exceptional Charlier and Hermite polynomials, *J. Approx. Theory* **182** (2014), 29-58.
- [34] A. J. DURÁN, Exceptional Meixner and Laguerre polynomials, *J. Approx. Theory* **184** (2014), 176-208.
- [35] A. J. DURÁN, Symmetries for Casorati determinants of classical discrete orthogonal polynomials, *Proc. Amer. Math. Soc.* **142** (2014), 915-930.
- [36] A. J. DURÁN, Wronskian type determinants of orthogonal polynomials, Selberg type formulas and constant term identities, *J. Combin. Theory Ser. A* **124** (2014), 57-96.
- [37] A. J. DURÁN, Constructing bispectral dual Hahn polynomials, *J. Approx. Theory* **189** (2015), 1-28.
- [38] A. J. DURÁN, Exceptional Hahn and Jacobi polynomials, *J. Approx. Theory* **214** (2017), 9-48.
- [39] A. J. DURÁN, Exceptional Hahn and Jacobi polynomials with an arbitrary number of continuous parameters, *Stud. Appl. Math.* **148** (2022), 606-650.
- [40] A. J. DURÁN, New examples of Krall-Meixner and Krall-Hahn polynomials, *J. Approx. Theory* **275** (2022), 105683.
- [41] A. J. DURÁN, Christoffel transform of classical discrete measures and invariance of determinants of classical and classical discrete polynomials, *J. Math. Anal. Appl.* **503** (2021), 125306, 29 pp.

- [42] A. J. DURÁN Y J. ARVESÚ,  $q$ -Casorati determinants of some  $q$ -classical orthogonal polynomials, *Proc. Amer. Math. Soc.* **144** (2016), 1655-1668.
- [43] A. J. DURÁN Y M. D. DE LA IGLESIA, Some examples of orthogonal matrix polynomials satisfying odd order differential equations, *J. Approx. Theory* **150** (2008), 153-174.
- [44] A. J. DURÁN Y M. D. DE LA IGLESIA, Second order differential operators having several families of orthogonal matrix polynomials as eigenfunctions, *Int. Math. Res. Not. IMRN* **2008** (2008), Art. ID rnn 084, 24 pp.
- [45] A. J. DURÁN Y M. D. DE LA IGLESIA, Constructing bispectral orthogonal polynomials from the classical discrete families of Charlier, Meixner and Krawtchouk, *Constr. Approx.* **41** (2015), 49-91.
- [46] A. J. DURÁN Y M. D. DE LA IGLESIA, Constructing Krall-Hahn orthogonal polynomials, *J. Math. Anal. Appl.* **424** (2015), 361-384.
- [47] A. J. DURÁN Y M. D. DE LA IGLESIA, Differential equations for discrete Laguerre-Sobolev orthogonal polynomials, *J. Approx. Theory* **195** (2015), 70-88.
- [48] A. J. DURÁN Y M. D. DE LA IGLESIA, Differential equations for discrete Jacobi-Sobolev orthogonal polynomials, *J. Spectr. Theory* **8** (2018), 191-234.
- [49] A. J. DURÁN Y F. A. GRÜNBAUM, Orthogonal matrix polynomials satisfying second order differential equations, *Int. Math. Res. Not.* **2004** (2004), 461-484.
- [50] A. J. DURÁN Y F. A. GRÜNBAUM, A characterization for a class of weight matrices with orthogonal matrix polynomials satisfying second order differential equations, *Int. Math. Res. Not.* **2005** (2005), 1371-1390.
- [51] A. J. DURÁN Y F. A. GRÜNBAUM, Structural formulas for orthogonal matrix polynomials satisfying second order differential equations, I, *Constr. Approx.* **22** (2005), 255-271.
- [52] A. J. DURÁN Y F. A. GRÜNBAUM, Orthogonal matrix polynomials, scalar type Rodrigues' formulas and Pearson matrix equations, *J. Approx. Theory* **134** (2005), 267-280.
- [53] A. J. DURÁN Y F. A. GRÜNBAUM, A survey on orthogonal matrix polynomials satisfying second order differential equations, *J. Comput. Appl. Math.* **178** (2005), 169-190.
- [54] A. J. DURÁN Y F. A. GRÜNBAUM, P. A. M. Dirac meets M. G. Krein: matrix orthogonal polynomials and Dirac's equation, *J. Phys. A* **39** (2006), 3655-3662.
- [55] A. J. DURÁN Y F. A. GRÜNBAUM, Matrix orthogonal polynomials satisfying second order differential equations: coping without help from group representation theory, *J. Approx. Theory* **148** (2007), 35-48.
- [56] A. J. DURÁN Y F. A. GRÜNBAUM, Matrix differential equations and scalar polynomials satisfying higher order recursions, *J. Math. Anal. Appl.* **354** (2009), 1-11.
- [57] A. J. Durán y M. Pérez, Admissibility condition for exceptional Laguerre polynomials. *J. Math. Anal. Appl.* **424** (2015), 1042-1053.
- [58] P. EHRENFEST Y T. EHERENFEST, Ü ber zwei bekannte Einwände gegen das Boltzmannsche H-Theorem, *Phys. Z.* **8** (1907), 311-314.
- [59] J. FAVARD, Sur les polynomes de Tchebicheff *C. R. Acad. Sci. Paris* **200** (1935), 2052-2053.
- [60] M. A. GARCÍA-FERRERO, D. GÓMEZ-ULLATE Y R. MILSON, A Bochner type characterization theorem for exceptional orthogonal polynomials, *J. Math. Anal. Appl.* **472** (2019), 584-626.
- [61] D. GÓMEZ-ULLATE, Y. GRANDATI Y R. MILSON, Rational extensions of the quantum Harmonic oscillator and exceptional Hermite polynomials, *J. Phys. A* **47** (2014), 015203.
- [62] D. GÓMEZ-ULLATE, Y. GRANDATI Y R. MILSON, Durfee rectangles and pseudo-Wronskian equivalences for Hermite polynomials, *Stud. Appl. Math.* **141** (2018), 596-625.
- [63] D. GÓMEZ-ULLATE, N. KAMRAN Y R. MILSON, An extended class of orthogonal polynomials defined by a Sturm-Liouville problem, *J. Math. Anal. Appl.* **359** (2009), 352-367.
- [64] D. GÓMEZ-ULLATE, N. KAMRAN Y R. MILSON, An extension of Bochner's problem: exceptional invariant subspaces, *J. Approx. Theory* **162** (2010), 987-1006.

- [65] D. GÓMEZ-ULLATE, N. KAMRAN Y R. MILSON, Exceptional orthogonal polynomials and the Darboux transformation, *J. Phys. A* **43** (2010), 434016.
- [66] Y. GRANDATI Y C. QUESNE, Disconjugacy, regularity of multi-indexed rationally-extended potentials, and Laguerre exceptional polynomials, *J. Math. Phys.* **54** (2013), 073512.
- [67] F. A. GRÜNBAUM Y L. HAINE, Orthogonal polynomials satisfying differential equations: the role of the Darboux transformation, *Symmetries an Integrability of Differential Equations (D. Levi, L. Vinet, P. Winternitz, Eds.)*, 143-154, CRM Proc. Lecture Notes, vol. 9, Amer. Math. Soc. Providence, RI, 1996.
- [68] F. A. GRÜNBAUM, L. HAINE Y E. HOROZOV, Some functions that generalize the Krall-Laguerre polynomials, *J. Comput. Appl. Math.* **106** (1999), 271-297.
- [69] F. A. GRÜNBAUM, I. PACHARONI Y J. TIRAO, Matrix valued orthogonal polynomials of the Jacobi type, *Indag. Math. (N.S.)* **14** (2003), 353-366.
- [70] F. A. GRÜNBAUM, I. PACHARONI Y I. ZURRIÁN, Time and band limiting for matrix valued functions: an integral and a commuting differential operator, *Inverse Problems* **33** (2017), 025005, 14 pp.
- [71] F. A. GRÜNBAUM, I. PACHARONI Y I. ZURRIÁN, Bispectrality and time-band limiting: matrix valued polynomials, *Int. Math. Res. Not. IMRN* **2020** (2020), 4016-4036.
- [72] F. A. GRÜNBAUM Y M. YAKIMOV, Discrete bispectral Darboux transformations from Jacobi operators. *Pacific J. Math.* **204** (2002), 395-431.
- [73] P. ILIEV, Krall-Jacobi commutative algebras of partial differential operators, *J. Math. Pures Appl.* **96** (2011), 446-461.
- [74] P. ILIEV, Krall-Laguerre commutative algebras of ordinary differential operators, *Ann. Mat. Pur. Appl.* **192** (2013), 203-224.
- [75] M. E. H. ISMAIL, *Classical and quantum orthogonal polynomials in one variable*, Encyclopedia of Mathematics and its Applications, vol. 98, Cambridge University Press, 2009.
- [76] M. KAC, Random walk and the theory of Brownian motion, *Amer. Math. Monthly* **54** (1947), 369-391.
- [77] R. KOEKOEK, Differential equations for symmetric generalized ultraspherical polynomials, *Trans. Amer. Math. Soc.* **345** (1994), 47-72.
- [78] J. KOEKOEK Y R. KOEKOEK, On a differential equation for Koornwinder's generalized Laguerre polynomials, *Proc. Amer. Math. Soc.* **112** (1991), 1045-1054.
- [79] J. KOEKOEK Y R. KOEKOEK, Differential equations for generalized Jacobi polynomials, *J. Comput. Appl. Math.* **126** (2000), 1-31.
- [80] R. KOEKOEK, P. A. LESKY Y L. F. SWARTTOUW, *Hypergeometric orthogonal polynomials and their  $q$ -analogues*, Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [81] F. KOHLRAUSCH Y E. SCHRÖDINGER, Das Ehrenfestsche Model der H-Kurve, *Physikalische Zeitschrift* **47** (1926), 306-313.
- [82] H. L. KRALL, Certain differential equations for Tchebycheff polynomials, *Duke Math. J.* **4** (1938), 705-718.
- [83] H. L. KRALL, *On orthogonal polynomials satisfying a certain fourth order differential equation*, The Pennsylvania State College Studies, No. 6, 1940.
- [84] H. L. KRALL Y O. FRINK, A new class of orthogonal polynomials: The Bessel polynomials, *Trans. Amer. Math. Soc.* **65** (1949), 100-115.
- [85] M. G. KREIN, Fundamental aspects of the representation theory of hermitian operators with deficiency index  $(m, m)$ , *Amer. Math. Soc. Transl. (2)* **97** (1970), 75-143.
- [86] M. G. KREIN, Infinite  $J$ -matrices and a matrix moment problem, *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **69** (1949), no. 2, 125-128.
- [87] K. H. KWON Y D. W. LEE, Characterizations of Bochner-Krall orthogonal polynomials of Jacobi type, *Constr. Approx.* **19** (2003), 599-619.

- [88] O. E. LANCASTER, Orthogonal polynomials defined by difference equations, *Amer. J. Math.* **63** (1941), 185-207.
- [89] L. L. LITTLEJOHN, The Krall polynomials: a new class of orthogonal polynomials, *Quaest. Math.* **5** (1982), 255-265.
- [90] L. L. LITTLEJOHN, An application of a new theorem on orthogonal polynomials and differential equations, *Quaest. Math.* **10** (1986), 49-61.
- [91] J. MAWHIN Y A. RONVEAUX, Schrödinger and Dirac equations for the hydrogen atom, and Laguerre polynomials, *Arch. Hist. Exact Sci.* **64** (2010), 429-460.
- [92] B. MIDYA Y B. ROY, Exceptional orthogonal polynomials and exactly solvable potentials in position dependent mass Schrödinger Hamiltonians, *Phys. Lett. A* **373** (2009), 4117-4122.
- [93] R. NEVALINNA, Asymptotische entwicklungen beschränkter funktionen und das Stieltjessche momentenproblem, *Ann. Acad. Scie. Fenn. A* **18** (1922), no. 5, 52 pp.
- [94] A. F. NIKIFOROV Y V. B. UVAROV, *Special functions of mathematical physics*, Birkhäuser, Basel, 1988.
- [95] A. F. NIKIFOROV, S. K. SUSLOV Y V. B. UVAROV, *Classical orthogonal polynomials of a discrete variable*, Springer Verlag, Berlin, 1991.
- [96] S. ODAKE Y R. SASAKI, Infinitely many shape invariant discrete quantum mechanical systems and new exceptional orthogonal polynomials related to the Wilson and Askey-Wilson polynomials, *Phys. Lett. B* **682** (2009), 130-136.
- [97] S. ODAKE Y R. SASAKI, Exactly solvable quantum mechanics and infinite families of multi-indexed orthogonal polynomials, *Phys. Lett. B* **702** (2011), 164-170.
- [98] S. ODAKE Y R. SASAKI, Dual Christoffel transformations, *Prog. Theor. Phys.* **126** (2011), 1-34.
- [99] I. PACHARONI Y J. A. TIRAO, Matrix valued orthogonal polynomials arising from the complex projective space, *Constr. Approx.* **25** (2006), 177-192.
- [100] C. QUESNE, Exceptional orthogonal polynomials, exactly solvable potentials and supersymmetry. *J. Phys. A* **41** (2008), 392001.
- [101] M. RIESZ, Sur le problème des moments, *Ark. för Mat., Astr. och Fys.* **16** (1922), (12) 23 p., (19) 21 p., y **17** (1923), (16) 62 p.
- [102] M. RIESZ, Sur le problème des moments et le théorème de Parseval correspondant, *Acta Litt. ac Sci., Szeged* **1** (1922), 209-225.
- [103] E. ROUTH, On some properties of certain solutions of a differential equation of the second order, *Proc. London Math. Soc.* **16** (1884), 245-261.
- [104] R. SASAKI, S. TSUJIMOTO Y A. ZHEDANOV, Exceptional Laguerre and Jacobi polynomials and the corresponding potentials through Darboux-Crum transformations, *J. Phys. A* **43** (2010), 315204.
- [105] E. SCHRÖDINGER, Quantisierung als Eigenwertproblem (Erste Mitteilung), *Ann. d. Phys.* **79** (1926), 361-376.
- [106] E. SCHRÖDINGER, Quantisierung als Eigenwertproblem (Zweite Mitteilung), *Ann. d. Phys.* **79** (1926), 489-527.
- [107] J. SINGER, F. A. GRÜNBAUM, P. KOHN Y J. ZUBELLI, Image reconstruction of the interior of bodies that differential radiation, *Science* **248** (1990), 990-993.
- [108] D. SLEPIAN Y H. O. POLLAK, Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and uncertainty, I, *Bell System Tech. Journal* **40** (1961), 43-64.
- [109] H. J. LANDAU Y H. O. POLLAK, Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and uncertainty, II, *Bell System Tech. Journal* **40** (1961), 65-84.
- [110] H. J. LANDAU Y H. O. POLLAK, Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and uncertainty, III, *Bell System Tech. Journal* **41** (1962), 1295-1336.
- [111] D. SLEPIAN, Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and uncertainty, IV, *Bell System Tech. Journal* **43** (1961), 3009-3058.

- [112] D. SLEPIAN, Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and unvertainty, V, *Bell System Tech. Journal* **57** (1978), 1371-1430.
- [113] M. H. STONE, *Linear transformations in Hilbert space and their applications to analysis*, American Mathematical Society, Providence, RI, 1932.
- [114] G. SZEGÖ, *Orthogonal polynomials*, American Mathematical Society, Providence, RI, 1959.
- [115] T. TANAKA, N-fold Supersymmetry and quasi-solvability associated with  $X_2$ -Laguerre polynomials, *J. Math. Phys.* **51** (2010), 032101.
- [116] J. TIRAO, The algebra of differential operators associated to a weight matrix: a first example, groups, algebras and applications, *Proceedings of the XVIII Latin American Algebra Colloquium (Sao Pedro, Brazil, August 3-8, 2009)*, 291-324, Contemporary Mathematics, 537, American Mathematical Society, Providence, RI, 2011.
- [117] L. VINET Y A. ZHEDANOV, Representations of the Schrödinger group and matrix orthogonal polynomials, *J. Phys. A* **44** (2011), 355201.
- [118] A. ZHEDANOV, A method of constructing Krall's polynomials, *J. Compt. Appl. Math.* **107** (1999), 1-20.
- [119] I. ZURRIÁN, The Algebra of differential operators for a Gegenbauer weight matrix, *Int. Math. Res. Not. IMRN* **2017** (2017), 2402-2430.

## **DISCURSO PRONUNCIADO POR EL ILMO. SR. D. ENRIQUE FERNÁNDEZ CARA**

*Académico Numerario,  
en contestación al leído por  
el Ilmo. Sr. D. Antonio J. Durán,  
en el acto de su recepción como académica numeraria,  
celebrado el día 1 de junio de 2022*

Excmo. Sr. Presidente, Excmos. Sres. Académicos, Señoras y Señores.

Es para mí un gran honor y un gran placer contestar al discurso de toma de posesión del Académico electo D. Antonio Durán Guardado, Catedrático de Análisis Matemático de la Universidad de Sevilla.

### **1. EL CANDIDATO**

Conozco al Profesor Durán Guardado desde hace mucho tiempo, desde pocos meses después de que él terminara sus estudios de Licenciado en Matemáticas (por cierto, con Premio Extraordinario), en 1985. Por tanto, no me produce ninguna sorpresa escuchar la larga lista de méritos que le atesoran. En la medida de mis posibilidades, doy fé de la calidad de todos ellos.

Me gustaría destacar, no obstante, algunos:

- El Profesor Durán Guardado es, a nivel internacional, un conocido especialista del análisis de las llamadas *funciones especiales* y, en particular, de la teoría de polinomios ortogonales. Ha contribuido a la resolución de varios problemas de importancia en este área.

Cada familia de polinomios ortogonales puede ser observada como una herramienta fundamental para conseguir *la mejor aproximación* de una función en un sentido apropiado. Así, estos polinomios constituyen objetos que permiten en la práctica describir y comprender, aunque sea de manera aproximada, cualquier fenómeno presente en la Naturaleza, en la Ciencia y en la Ingeniería. Por ejemplo, permiten determinar “de la forma más exacta posible” la evolución de la densidad de población de un hábitat, el estado cuántico de una partícula sometida a los efectos de un potencial, la deformación de un cuerpo elástico sometido a esfuerzos externos, etc.

Por otra parte, los problemas interesantes en este campo de trabajo conectan técnicas y resultados de distintas áreas de las Matemáticas: la teoría de la medida y el análisis funcional, la teoría de operadores, el análisis de Fourier, el análisis teórico y numérico de las ecuaciones diferenciales, el cálculo de probabilidades, etc. Y poseen motivaciones e interpretaciones absolutamente naturales en Física y otras Ciencias.

En consecuencia, profundizar en la comprensión de las familias de polinomios ortogonales y en sus aplicaciones es una tarea de gran interés que necesita ser llevada a cabo.

Aun a riesgo de repetir demasiado, mencionaré algunas aportaciones del Profesor Durán Guardado:

- La determinación de una medida respecto de la cual son ortogonales los polinomios de Bessel.
- La construcción de polinomios de Krall discretos asociados a operadores en diferencias de orden par arbitrario.
- Varios resultados sobre polinomios ortogonales matriciales. Entre otros, la resolución explícita de ciertos sistemas diferenciales ordinarios que conducen a la construcción de familias de polinomios ortogonales matriciales no triviales, etc.

Estos resultados pueden estar en el punto de partida de la respuesta a muchas otras cuestiones de interés.

La labor investigadora del Profesor Durán Guardado ha sido reconocida internacionalmente de manera clara dentro y fuera de su área de trabajo. Como dato ilustrativo, diré que figura en la lista Stanford del 2% de científicos de alto impacto.

- Como divulgador de las Matemáticas y de la Ciencia en general, el Profesor Durán Guardado ha hecho gala de una actividad de gran calidad e intensidad a lo largo de varias décadas.

Ha conseguido dar a conocer numerosos detalles que, sin duda, ayudan a comprender la gestación de la Ciencia en determinados momentos históricos de relevancia. A pesar de que no se trata, desgraciadamente, de algo considerado prioritario por una parte de la comunidad científica, los que tenemos ya unos años de actividad comprendemos cada vez más y mejor que resulta muy positivo acudir a los orígenes de las ideas y descubrimientos. Para llegar lo más lejos posible en nuestro proceso de comprensión del universo, es oportuno aproximarse a la mentalidad y a las circunstancias vitales de las personas que fueron capaces de proponer los distintos modelos: Copernico, Galileo, Newton, Einstein... Considero muy de agradecer la tarea llevada a cabo por el Profesor Durán Guardado en este ámbito. En particular, me gustaría mencionar la excelente descripción que hace en su libro *Pasiones, piojos, dioses... y matemáticas* (Editorial Destino, Barcelona 2009) de la *Escuela Matemática de Lwow* (Leópolis). Un fantástico grupo de matemáticos que contribuyó a avances significativos en Topología, Teoría de



Conjuntos y Análisis Funcional y sus aplicaciones, entre otras, a la resolución de ecuaciones diferenciales. Un colectivo literalmente machacado y exterminado por la ignominia nazi.

Por otra parte, el Profesor Durán Guardado ha propiciado la participación de personalidades del ámbito científico en numerosas actividades de divulgación de gran nivel. Por citar algunos ejemplos, gracias a él, muchos hemos sido capaces de disfrutar de la presencia en nuestro entorno de Gustavo Bueno, Fernando Sabater y José Manuel Sánchez Ron.

Dan testimonio de esta faceta sus libros publicados, las ediciones de obras clásicas que ha llevado a cabo, las exposiciones de libros antiguos que ha organizado y, más recientemente, la puesta en marcha y dirección del Blog del Instituto de Matemáticas de la Universidad de Sevilla.

- Por si fuera poco, me gustaría también destacar sus actividades relacionadas con la gestión de la investigación.

El Profesor Durán Guardado es y ha sido Investigador Principal de un buen número de proyectos de investigación en el ámbito nacional e internacional. Adicionalmente, fue Vicerrector de Relaciones Institucionales de la Universidad Internacional de Andalucía, miembro del Consejo Ejecutivo del Proyecto CONSOLIDER de Matemáticas, una iniciativa de enorme calado que dejó una innegable en nuestro entorno y también figuró como Coordinador en varias solicitudes de Unidad María de Maeztu presentadas en años pasados.

## 2. MI PUNTO DE VISTA

Los datos mandan. Cuando un científico realiza actividades de investigación que son reconocidas por los distintos agentes, posee además una brillante y efectiva trayectoria divulgadora y ha sido capaz de gestionar con éxito fondos de investigación, no queda mucho que añadir.

Bueno, tal vez quedan, por así decirlo, los aspectos coyunturales: por qué haber elegido una u otra área de trabajo, por qué haberse centrado en tal o cual problema y haber contactado con un colaborador u otro.

Generalmente, no somos del todo libres en este aspecto. Las personas que nos preceden y en las que nos fijamos por alguna u otra razón al comienzo de nuestra carrera, a veces sin ser conscientes de ello, nos marcan el camino. Por supuesto, después está nuestra iniciativa (cuando se dan las condiciones), pero el punto de partida se nos sirve muchas veces sin que podamos intervenir en su elección y es justo y de bien nacidos reconocerlo con sencillez y agradecimiento.

Así que en nuestras trayectorias tiene que ver (y mucho) la suerte. Yo la tuve y me siento muy afortunado por ello.

Me consta que el Profesor Durán Guardado también la tuvo en su día. Como él mismo ha mencionado, haber conocido al Profesor Juan Arias de Reyna, Académico de número de esta institución, fue fundamental. También lo fue (y creo que lo sigue siendo)

escucharle, comprenderle y tratar de sacar todo el partido del mundo de su persona.

Terminaré mi intervención en un tono más personal. Tengo la suerte de contar con la amistad del Profesor Durán Guardañó y de haber tenido conocimiento directo de su día a día desde hace años. Este día a día me impresiona por su incesante actividad, que permanentemente contiene actividades como las que se describen más arriba y muchas cosas más.

Estoy absolutamente convencido de que su incorporación será una gran suerte para la Real Academia Sevillana de Ciencias. Su presencia tendrá un gran significado y, sin duda, importantes consecuencias.

Tengo la convicción de que, desde el ámbito de la Academia, seguirá dando a conocer los aspectos históricos y los avances científicos de muchos campos de trabajo, impulsará la presencia de la opinión científica en los foros donde sea posible y contribuirá a la organización y participación activa en acciones pertinentes.

# **LA CIENCIA DE LA ECOLOGÍA Y EL ANÁLISIS DE LA COMPLEJIDAD**

*Discurso de recepción  
como académica de número de la  
Real Academia Sevillana de Ciencias por el  
Ilmo. Sr. D. Pedro Jordano Barbudo,  
celebrado el día 3 de octubre de 2022*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los científicos caminamos siempre "apoyados en hombros de gigantes", como reza la metáfora, refraseada por Newton en una forma preciosa, "*If I have seen further it is by standing on the shoulders of Giants*". La frase refleja cómo los científicos no hacemos sino usar la enorme herencia de conocimiento que hemos recibido. Por ello siempre debemos estar agradecidos a nuestros maestros y mentores, los gigantes que pusieron en nuestras manos la mejor herramienta que tenemos para atesorar conocimiento: el método científico.

Agradezco por ello en primer lugar a mis profesores de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Córdoba, por su dedicación y esfuerzo en los tiempos iniciales de la facultad. En segundo lugar, a mis profesores y a la vez compañeros en la Estación Biológica de Doñana (CSIC) que me formaron como naturalista y como ecólogo, donde desearía destacar a los profesores José Antonio Valverde, Javier Castroviejo y, especialmente, Miguel Delibes y Carlos M. Herrera por su inestimable ayuda durante mi carrera científica.

No menos importante para mí ha sido el apoyo y ayuda de los estudiantes y componentes del equipo de investigación (*Integrative Ecology Group*, Estación Biológica de Doñana) a lo largo de los años y especialmente a partir de 1995, así como los numerosos, ya centenares, estudiantes de máster en la Universidad Pablo de Olavide y, en el curso de doctorado en la Universidad de Sevilla, aquellos, más de una veintena, a quienes he tenido la enorme honra de dirigir en sus proyectos de doctorado. Siempre han sido una fuente de ánimo, ideas, entusiasmo e inspiración, con un enorme valor como apoyo en los tiempos difíciles. Es un privilegio también formar parte del claustro de la Universidad de Sevilla, en el departamento de Biología Vegetal y Ecología, donde siempre me han abierto las puertas a mi actividad docente, que considero crucial para un investigador como yo.

Mi agradecimiento sincero a los profesores Andrés Aguilera, Benito Valdés, Francisco García-Novo, Miguel Ángel de la Rosa Acosta y Miguel García Guerrero por promover mi candidatura inicial a académico numerario, y al profesor Valdés por hacerme el honor en responder a este discurso.

Por último, lo más importante, mi familia. Todo mi agradecimiento y cariño para Myriam Márquez, y nuestros hijos Diego Jordano Márquez y Pedro Antonio Jordano Márquez. A ella debo todo pues verdaderamente constituye una especie de caparazón que detiene los envites y sinsabores que, a veces, tiene nuestro oficio. Pero, a la vez, es donde mejor podemos celebrar las alegrías de la ciencia: tanto esos momentos “eureka” como aquellas circunstancias que nos honran y estimulan, como es este nombramiento como académico numerario de la Real Academia de Ciencias de Sevilla.

## **INTRODUCCIÓN**

Es menester comenzar resaltando mi enorme emoción en este momento, al disponerme a presentar algunas de mis ideas ante tan distinguida audiencia para, humildemente, corresponder a mi elección como académico de número en esta Real Academia Sevillana de Ciencias. Confío en que su indulgencia sabrá perdonar mis torpezas y carencias para agradecer como es debido la inestimable honra de proponerme como miembro de esta institución. En ella veo maestros y colegas que siempre han correspondido con su afecto a mi confianza y a quienes siempre he admirado; fruto de este afecto es vuestra generosa designación, a la que me honra expresar mi agradecimiento sincero y profundo.

Los científicos caminamos siempre “apoyados en hombros de gigantes”, como reza la metáfora de “*nanos gigantium humeris insidentes*”, erróneamente atribuida a Isaac Newton en su carta de 1675 a Robert Hooke, ya que realmente pertenece a la idea de Bernard de Chartres, datada en el s. XII. Newton, no obstante, la refrasea en una forma preciosa –“*If I have seen further it is by standing on the shoulders of Giants*”– que refleja cómo los científicos no hacemos sino usar la enorme herencia de conocimiento que hemos recibido. Por ello siempre debemos estar agradecidos a nuestros maestros y mentores, los gigantes que pusieron en nuestras manos la mejor herramienta que tenemos para atesorar conocimiento: el método científico.

### ***Consideraciones generales sobre la ciencia en España***

Momento en el que vienen a mi cabeza las lecturas de discursos brillantes, emocionantes, lúcidos, e inspiradores de grandes académicos de la ciencia española, en los cuales se resalta el papel de la ciencia en nuestra sociedad. Papel crucial no siempre reconocido, sino más bien desdeñado e ignorado. Efectivamente, la ciencia española pasa por un período ya demasiado largo de ausencia de liderazgo, de falta de una visión de alcance capaz de situarla en el lugar que merece en el ámbito mundial. Hay varios factores

que contribuyen a ello y que han sido lúcidamente analizados desde, como mínimo, los escritos pioneros de Jovellanos y luego reanalizados y repensados en soberbios ensayos de Cajal, Rey Pastor, Carracido, Echegaray y tantos y tantos otros que defendieron la ciencia y la razón<sup>[1]</sup>. Junto a una financiación claramente insuficiente para el potencial enorme que tienen los equipos científicos españoles, encontramos una política científica basada en la microgestión, con ausencia de visión amplia y aglutinante. A ello se une un incesante drenaje de talento que ha supuesto una pérdida creciente de personal investigador y técnico durante los últimos 20 años. Esta pérdida ha sido más acuciante aun en el caso de las mujeres científicas, tanto por razones de dificultad de la continuidad de sus carreras académicas como por el hecho de persistir sesgos implícitos en los procesos de selección que no tienen una solución fácil, ya que su origen último está más allá de los límites del ámbito científico-académico. El resultado es una composición de grupos de investigación muy sesgada y a menudo carente de la diversificación que, en última instancia, favorece la creatividad y alimenta el potencial de los grupos. Si a los sesgos de género unimos la limitada internacionalización de los equipos, nos encontramos estas carencias de diversificación. Ello se traduce en techos de cristal para la actividad de los grupos de investigación, resignados a planteamientos continuistas por la imposibilidad de plantear retos de amplio alcance. El problema es la enorme dificultad para conseguir grupos de investigación con suficiente tamaño crítico como para abordar los grandes retos que se encuentran en la frontera del conocimiento. En la raíz del problema está la falta de predecibilidad de la financiación, dada su limitada cuantía en los presupuestos generales del Estado, que hace que las líneas de investigación se planteen a menudo con objetivos cortoplacistas, de limitado alcance. Los efectos son perversos ya que se entra en un vórtice retroalimentado según el cual un equipo pequeño se queda escasamente diversificado, insuficientemente financiado y obligado a planteamientos conceptuales muy alejados de una buena relación riesgo/avance: no se asumen riesgos y, por tanto, somos incapaces de afrontar problemas que realmente trasciendan en cambios de paradigma y avances significativos. Es un vórtice perverso porque nos obliga a mantenernos en una zona de confort intelectual, incapaces de abordar grandes retos.

Pero no es este corsé intelectual el único factor limitante. Además, la ciencia española trabaja encorsetada en un ajustado régimen burocrático-administrativo que no deja feliz a nadie: ni a los científicos, ni a los gestores, ni a las agencias de financiación de la ciencia. La carga normativa que soportan los grupos de investigación es muy elevada, resta un enorme tiempo y energía al trabajo científico, se incrementa año tras año, carece de flexibilidad adaptativa a las condiciones cambiantes del desarrollo de los proyectos de investigación, y no es funcional –por su enorme ineficiencia– para su finalidad última de rendición de cuentas. No hay nadie más acostumbrado a rendir cuentas que un científico: cada manuscrito científico que remitimos a una revista para su publicación es, en esencia, una rendición de cuentas de la fiabilidad, rigurosidad, destreza técnica y garantías de reproducibilidad de nuestro trabajo de investigación. Por lo tanto, no conozco a nadie que pida un cheque en blanco y una ausencia de control en la ejecución de fondos públicos. Pero lo que sí oigo son voces que reclaman medidas burocráticas simples y efectivas, que no por ello han de ser menos rigurosas.

Como habrán podido deducir, no soy optimista sobre la situación de la ciencia española. Y me preocupa porque la ciencia es uno de los pilares fundamentales para el desarrollo de una sociedad democrática que goce de la estabilidad necesaria para sacar el mayor partido del talento colectivo de su ciudadanía. Hemos de encontrar soluciones para esta situación y conseguir que la institución científico-académica escape a esa especie de posibilismo perpetuo en que nos encontramos, siempre con la esperanza de que llegue un cambio político que, favorable al desarrollo científico-técnico, marque de verdad un rumbo certero y resulte en un claro avance de la ciencia española. Un posibilismo que nos hace seguir siempre adelante a base de vocación, tesón, afición, oficio, imaginación, etc. O sea, a base de todos esos intangibles que, si no están bien amparados y potenciados por el Estado y por la sociedad, siempre se quedan en esfuerzo ineficazmente aplicado. Digamos que no soy un simple optimista; mi optimismo sobre la ciencia española es, como decía Paul Romer, galardonado con el Premio Nobel de Economía, un optimismo condicional. No podemos quedarnos en el diagnóstico y realmente debemos ser mucho más proactivos respecto a las acciones y a los cambios que hemos de acometer. La respuesta equivocada al problema de ciencia española sería la desesperación o la adopción de una posición pesimista. En lugar de optimismo claro y complaciente, necesitamos este optimismo condicional. El optimismo complaciente, posibilista, es cuando un niño espera pasivamente para recibir un regalo maravilloso. El optimismo condicional, en cambio, es cuando un niño piensa en construir una casa en el árbol y busca clavos, pilas de leña y herramientas y mira a su alrededor para obtener ayuda de amigos para terminar con una maravillosa casa en el árbol. Necesitamos una acción concertada (ayuda mutua) y sabemos cómo cambiar la realidad científico-académica española, siempre que existan las condiciones adecuadas. El posibilismo pesimista fomenta la negación, la dilación, la apatía, la ira y la recriminación. Es el optimismo condicional lo que saca lo mejor de nosotros.

### ***La ciencia de la Ecología y el estudio de las interacciones***

La ecología es la ciencia de las interacciones. Podemos encontrar sus raíces en el trabajo pionero de Aldous Ernst Haeckel en 1866<sup>[2]</sup>, donde adoptó la raíz “casa”, οἶκος, para dar nombre a la ciencia que analiza las relaciones entre las especies y con el ambiente. En palabras de Haeckel (p. 286): “*Unter Oecologie verstehen wir die gesammte Wissenschaft von den Beziehungen des Organismus zur umgebenden Aussenwelt, wohin wir im weiteren Sinne alle “Existenz-Bedingungen” rechnen können.*” [Por “ecología” entendemos la ciencia integral de las relaciones del organismo con su entorno circundante, donde podemos incluir, en el sentido más amplio, todas las “condiciones de existencia”]. Algunos desarrollos posteriores, raramente citados, como los de Jakob Johann von Uexküll (1864-1944)<sup>[3]</sup> sobre la “percepción” del medio ambiente por los seres vivos (el *umwelt*) dieron paso a una consolidación progresiva de la Ecología como ciencia a finales del s. XIX.

Permítanme un breve paréntesis para comentar sobre la situación de la ciencia ecológica en España. Cualquier diagnóstico certero sobre la ciencia española avala su excepcional desarrollo, a la vista de cualquier indicador que podamos usar sobre producción científica, número de investigadores por 100000 habitantes, comparativa con países OCDE, etc. El problema es que este desarrollo aún está muy por debajo del enorme potencial que la ciencia española atesora. Sorprende constatar cómo la visibilidad internacional e indicadores de producción científica estandarizados por ámbito están bastante por encima de la media para diferentes disciplinas científicas en España, entre ellas varias de desarrollo y florecimiento muy reciente en nuestro país, y especialmente si atendemos a indicadores estandarizados de la producción científica<sup>[4]</sup>. Así la Ecología española muestra niveles de citación y visibilidad internacional próximos a EEUU, Reino Unido y países nórdicos, por encima de otros con mayores niveles de financiación para la ciencia; en 2019<sup>[4]</sup>, los 7.883 documentos publicados en el área de Ciencias Medioambientales fueron citados en un 38% por encima de la media mundial, con un 26,9 % incluido en el 10% de los artículos más citados en su ámbito (este % es del 16,7 % para la producción científica global española). En su documentado análisis histórico sobre la implantación de la ecología en España<sup>[5]</sup>, García-Novo destaca su crecimiento en las cinco últimas décadas, muy a la par que el desarrollo de iniciativas conservacionistas, como por ejemplo la creación del Parque Nacional de Doñana, entre otras áreas protegidas. Hay dos circunstancias que contribuyeron a ello: 1) el uso de aproximaciones innovadoras al estudio de problemas ecológicos; 2) la creciente internacionalización tanto en los equipos de investigación como en la escala de los proyectos abordados. Sólo quería dejar constancia en este breve paréntesis del marco científico e intelectual, a mi juicio de excepcional calidad y altura, en el que se encuentra la ecología española.

El desarrollo histórico del estudio de las interacciones ecológicas se inicia probablemente con el análisis de las redes tróficas. Los estudios académicos sobre las innumerables conexiones entre especies se remontan al menos a al-Jāhiz en el siglo IX o incluso antes de Aristóteles en el siglo IV a.C.<sup>[6]</sup>. Fue con el florecimiento de los grandes naturalistas a finales del s. XIX cuando el estudio de las interacciones entre especies despegó como elemento clave en estudios ecológicos. Singularmente, Darwin<sup>[7]</sup> usó numerosos ejemplos de interacciones entre especies para ilustrar el potencial de la selección natural, con párrafos maravillosos como cuando afirma, admirándose: *“I am tempted to give one more instance showing how plants and animals, most remote in the scale of nature, are bound together by a web of complex relations”*. [“Me tienta dar un ejemplo adicional de cómo plantas y animales, remotamente relacionados, están unidos por una red de relaciones complejas”]. Darwin, ya en 1859, nos hablaba de una red compleja de interacciones. Pero la complejidad de las interacciones entre especies no comenzó a desvelarse hasta los estudios de finales de los '70 sobre redes tróficas<sup>[8]</sup>, a la búsqueda de principios generales organizativos de tal complejidad.

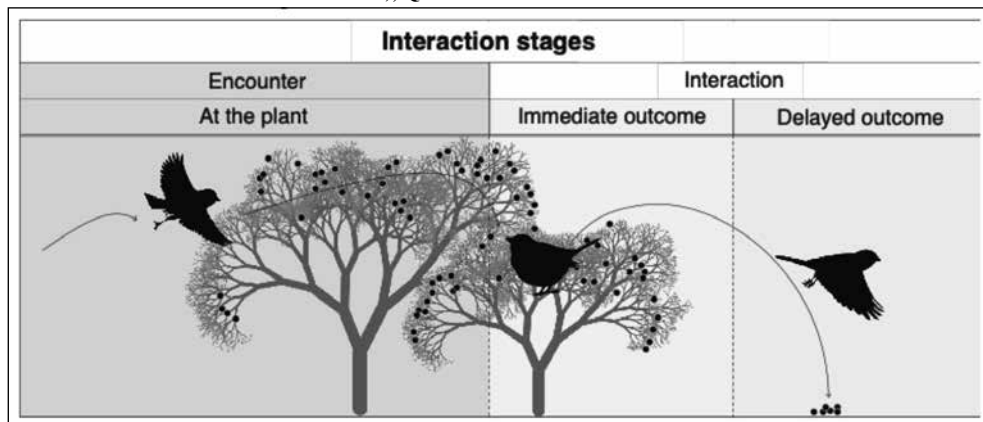
**PARTE I. INTERACCIONES ECOLÓGICAS Y COMPLEJIDAD**

Ninguna especie en la Tierra vive sin interactuar con otras especies. Las interacciones ecológicas son, por lo tanto, un componente fundamental de la biodiversidad: necesitamos documentar esas interacciones para evaluar los servicios y funciones ecológicas cruciales que representan.

Una interacción ecológica en la naturaleza es, simplemente, un encuentro entre dos individuos de diferentes especies, resultado del cual se producen efectos sobre ellos (Fig. 1). Dependiendo del signo y dirección de estos efectos estas interacciones pueden tener una enorme diversidad de consecuencias<sup>[9]</sup>.

**FIGURA 1**

**ESQUEMA CONCEPTUAL DE LAS DIFERENTES ETAPAS QUE PODEMOS CONSIDERAR EN UNA INTERACCIÓN ECOLÓGICA ENTRE INDIVIDUOS DE DIFERENTES ESPECIES, COMO POR EJEMPLO UN ANIMAL FRUGÍVORO QUE VISITA UNA PLANTA CON FRUTOS PARA ALIMENTARSE Y, POSTERIORMENTE, DISPERSAR LAS SEMILLAS A CIERTA DISTANCIA DE LA PLANTA MATERNA. PODEMOS CONSIDERAR EFECTOS INMEDIATOS DE LA INTERACCIÓN (DURANTE EL ENCUENTRO, COMO P. EJ., SI LAS SEMILLAS SON DAÑADAS O NO DURANTE LA MANIPULACIÓN DEL FRUTO), PERO TAMBIÉN EFECTOS APLAZADOS (P. EJ., SI LAS SEMILLAS SON DISPERSADAS A LUGARES ADECUADOS PARA SU GERMINACIÓN O NO DURANTE LA MANIPULACIÓN DEL FRUTO), QUE DEVIENEN YA PASADA LA INTERACCIÓN REAL**



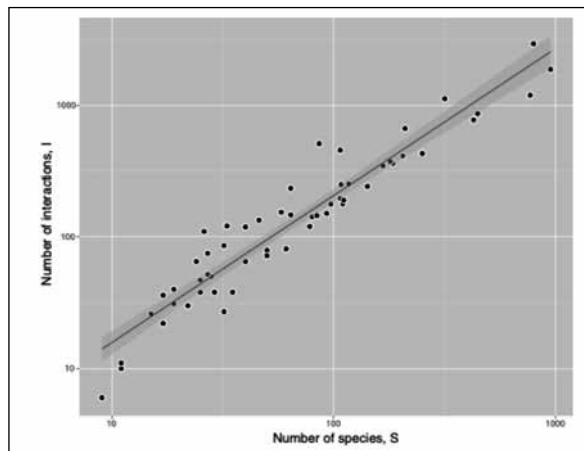
Estas consecuencias son las que definen la diversidad de modos de interacción en la naturaleza y de ellos depende la variedad de formas de coevolución entre especies que podemos encontrar<sup>[9,13]</sup>. Muy a menudo estas consecuencias se pueden medir en estudios experimentales en campo y se resumen en efectos sobre la adecuación (*fitness*) de los individuos que interactúan. Por ejemplo, estimaciones de la proporción de frutos consumidos, o de flores polinizadas de manera efectiva o bien, por parte de los animales, la variación en condición corporal tras la interacción (p. ej., energía obtenida, balance de nutrientes, etc.).



Es importante señalar que la mayor parte de estudios sobre interacciones ecológicas abordan éstas desde la perspectiva de interacciones entre especies<sup>[10]</sup>. Pero en la naturaleza lo que observamos son interacciones entre individuos, de tal forma que, posteriormente, las condensamos en una visión resumida a escala de especie<sup>[11]</sup>. Tal consideración de interacciones basadas en individuos es fundamental para poder conectar la diversidad de interacciones y modos de interacción con las consecuencias sobre *fitness* y, por tanto, poder hilvanar las consecuencias ecológicas con las evolutivas. Además es la forma más realista biológicamente de interpretar qué es lo que acontece en la naturaleza. Así, si extrapolamos la riqueza de interacciones que documentamos entre especies para estimar qué número de interacciones ocurrirían entre individuos de esas especies, realmente entenderíamos la enorme dimensión real que mantiene la red de interacciones que soporta un ecosistema.

A medida que aumenta la riqueza de especies en un área determinada, aumenta el número de interacciones, tanto posibles como las que realmente ocurren<sup>[12]</sup>. Por ejemplo, para un conjunto de  $P$  especies de plantas y  $A$  especies animales (tal como plantas con flor y sus polinizadores) el máximo número de interacciones observables es  $A * P$ . Sin excepción, no obstante, nunca se registra tal máximo, sino que el número de interacciones registradas,  $I$ , es sólo una fracción de este máximo posible incluso en el caso de interacciones muestreadas con suficiente esfuerzo como para suponer que la diversidad de interacciones está suficientemente muestreada. La caracterización (el “catálogo” o inventario) de la riqueza de interacciones que ocurren en un ecosistema determinado forma parte del análisis de su biodiversidad. Tales interacciones son una componente de

**FIGURA 2**  
**VARIACIÓN DEL NÚMERO DE INTERACCIONES ENTRE ESPECIES ( $I$ ) A MEDIDA QUE AUMENTA EL NÚMERO TOTAL DE ESPECIES,  $S$ , EN UN ECOSISTEMA DETERMINADO. NÓTESE LA ESCALA LOGARÍTMICA EN AMBOS EJES<sup>[12]</sup>, ABARCANDO ENTRE 2-2,5 ÓRDENES DE MAGNITUD. CADA PUNTO ES UN CONJUNTO DE ESPECIES DE ANIMALES Y PLANTAS CON INTERACCIONES MUTUALISTAS DE DISPERSIÓN DE SEMILLAS O DE POLINIZACIÓN EN UN ÁREA DETERMINADA**



la biodiversidad total del ecosistema, más allá de, simplemente, el número de especies que contiene.

El muestreo de interacciones ecológicas presenta desafíos, problemas, posibles sesgos y limitaciones similares a los que encontramos en el muestreo de individuos y especies en los inventarios de biodiversidad. Las estimaciones sólidas del número real de interacciones (enlaces) entre especies de vida libre dentro de redes ecológicas diversificadas requieren un esfuerzo de muestreo adecuado que debe medirse explícitamente; sin embargo, carecemos aún de una teoría de muestreo que se centre explícitamente en las interacciones ecológicas. Los desafíos logísticos del muestreo de interacciones son enormes, dado que el número de interacciones aumenta muy rápidamente con el número de especies (Fig. 2). Debido a su alta generalización, alta rotación (*turnover*) temporal y espacial de especies y alta complejidad de los patrones de asociación, el muestreo adecuado de las interacciones ecológicas es un desafío y requiere un esfuerzo logístico muy grande<sup>[11]</sup>. A pesar de estas limitaciones se pueden alcanzar estimaciones robustas de la diversidad de interacciones en ecosistemas de cierta diversidad, aunque ello requiere esfuerzos de muestreo considerables<sup>[10-12]</sup> y, además, requiere combinar diferentes métodos, lo cual ayuda a una detección de interacciones más completa. Por ejemplo, la combinación de muestreo directo por observación en plantas focales con el uso de técnicas genéticas basadas en *barcoding* de ADN o con el uso de muestreo pasivo por medio de fototrampeo<sup>[14]</sup>.

Las limitaciones arriba mencionadas son análogas a las existentes en otros análisis de interacciones entre "entidades" biológicas como, por ejemplo, las interacciones entre proteínas, las interacciones entre genes para la expresión génica, o las interacciones neuronales en el cerebro<sup>[15]</sup>. Todos ellos son sistemas altamente complejos, caracterizados por estar compuestos de múltiples "partes" o componentes relacionados entre sí por medio de interacciones.

La medida en que un sistema de  $n$  componentes discretos integra información de manera sinérgica se puede cuantificar<sup>[16]</sup>, de modo que el sistema actúa como algo más que la unión de sus partes. Esto requiere evaluar las interacciones causales entre todas las particiones posibles del sistema. Si consideramos todas las distintas formas en que el sistema se puede descomponer en partes, tal evaluación no se puede hacer sobre una base estadística (como, por ejemplo, con un gas ideal) porque cada interacción es particular: los genomas, las proteínas y las células interactúan de manera específica. Por lo tanto, es necesario evaluar todas las biparticiones, todas las formas en que el sistema se puede dividir en tres, cuatro, cinco partes, etc. El número de formas en que se puede particionar un sistema se conoce como número de Bell ( $B_n$ ). Para tres elementos, hay  $B_3 = 5$  posibles particiones; tres genes, proteínas, especies, o células pueden no interactuar en absoluto, o dos de ellos pueden interactuar, o los tres, para un total de cinco posibilidades. Comprender el sistema requiere medir la probabilidad y magnitud de cada una de estas cinco particiones. Colectivamente, la suma total de todas las interacciones se conoce como el interactoma<sup>[17,18]</sup>. Pero por desgracia el número de Bell escala más rápido que exponencialmente. Así,  $B_5 = 52$  y  $B_{10}$  ya alcanza 115.975, siendo la aproximación asintótica estándar de  $B_n$  para grandes números<sup>[17]</sup>:  $\log(B_n) \approx n[\log(n) - 1]$ .

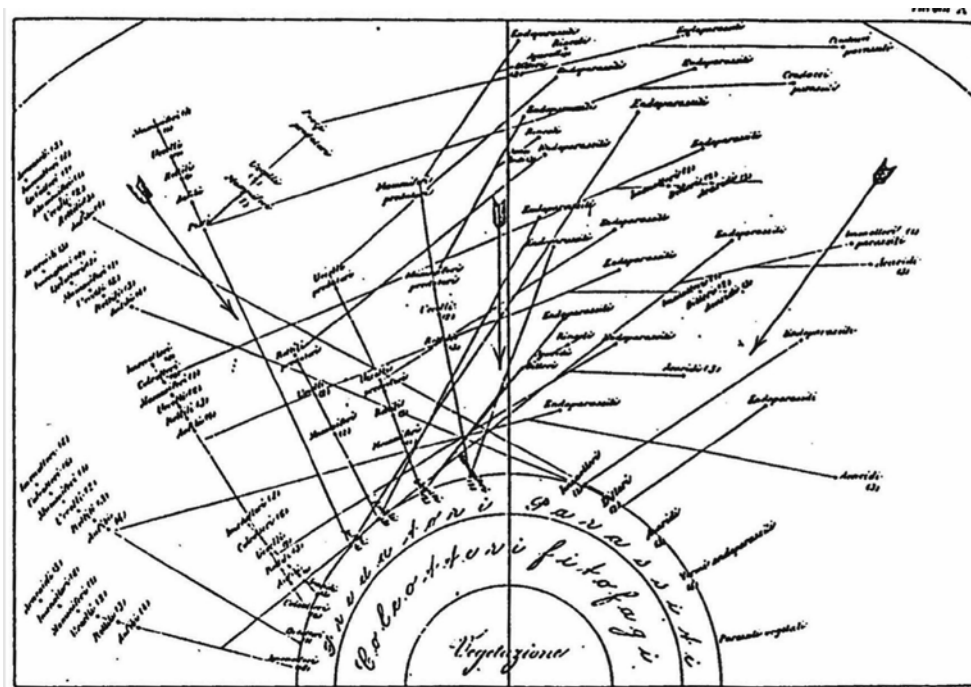
Parfraseando a Koch y Laurent<sup>[19]</sup>, cuando se refieren al cerebro como sistema complejo, podríamos afirmar que, por ahora, tal vez lo más obvio que hay que decir sobre la función de los ecosistemas desde una perspectiva de "sistemas complejos" es que el reduccionismo y la atomización continuos probablemente no conducirán, por sí solos, a una comprensión fundamental. No es posible enumerar y probar experimentalmente cada interacción entre pares de especies en un ecosistema, al igual que es imposible llevar a cabo tal prueba para cada tipo de conexión entre pares de neuronas en el cerebro. Sabemos por la proteómica que no todas las proteínas interactúan entre sí. Del mismo modo, sabemos por neuroanatomía que los cerebros no están completamente interconectados, sino que principalmente forman sinapsis locales. Sin embargo, el número de posibles interacciones en ambos casos sigue siendo del orden de  $10^5$  o más, lo que implica un interactoma que es astronómicamente grande. Cabe pensar que los interactomas de sistemas ecológicos concretos pueden alcanzar tamaños próximos a éstos, especialmente si consideramos interacciones a nivel de individuo y no a escala de especies, tal y como hemos señalado anteriormente.

Todo lo anterior son malas noticias para los esfuerzos de conservación de la Biodiversidad. El reciente informe del IPBES<sup>[20]</sup> señala la rápida pérdida de biodiversidad a la que asistimos, cuya proyección futura es realmente alarmante. La pérdida de especies se sitúa dentro de los márgenes de extinción de especies que encontramos en el registro fósil en cualquiera de los cinco eventos de extinción masiva que han acontecido en nuestro planeta<sup>[21]</sup>. En vista de los posibles impactos en la humanidad, una necesidad clave en el pronóstico biológico es el desarrollo de técnicas para poder diagnosticar anticipadamente situaciones de transición crítica global<sup>[22]</sup>, idealmente a tiempo para hacer algo al respecto. Con sistemas complejos como los que hemos discutido el reto se torna enorme<sup>[23]</sup>: necesitamos con urgencia métodos y técnicas capaces de detectar aspectos de la Biodiversidad son críticos para su mantenimiento; o sea, ¿qué funciones ecológicas son clave, de forma que su conservación es absolutamente prioritaria para garantizar la preservación de un ecosistema? Estos retos de conocimiento son análogos a los que tenemos para encontrar tratamientos eficientes ante enfermedades devastadoras, que afectan a órganos de alta complejidad como nuestro cerebro (Alzheimer) o en los que intervienen mecanismos de gran complejidad (cáncer). Por ejemplo, la propiedad más llamativa de las proteínas cancerosas es el aumento de la frecuencia de interacciones en las que participan: las proteínas cancerosas contienen una alta proporción de dominios altamente promiscuos, en términos del número de proteínas diferentes con las que interactúan<sup>[24]</sup>. Así, podemos utilizar nuestra comprensión de la red compleja de interacciones entre proteínas para guiar los experimentos hacia regiones del interactoma que puedan modular los procesos celulares involucrados en el cáncer. Tal abordaje queda lejos de aproximaciones reduccionistas que, como hemos indicado, serían inservibles para resolver los problemas derivados de estos sistemas complejos.

**PARTE II. REDES COMPLEJAS: EL “ENTANGLED BANK”**

Darwin<sup>[7]</sup> nos hablaba del “*entangled bank*”, esa fascinante “maraña” de relaciones entre los seres vivos que guía su evolución: “*It is interesting to contemplate an entangled bank, clothed with many plants of many kinds, with birds singing on the bushes, with various insects flitting about, and with worms crawling through the damp earth, and to reflect that these elaborately constructed forms, so different from each other, and dependent on each other in so complex a manner, have all been produced by laws acting around us*”. [“Es interesante contemplar una orilla de un río, vestida con muchas plantas de muchos tipos, con pájaros cantando en los arbustos, con insectos revoloteando, y con lombrices excavando el húmedo suelo; y reflexionar que estas formas elaboradamente construidas, tan diferentes entre sí, y dependientes entre sí de manera tan compleja, han sido producidas por leyes que actúan a nuestro alrededor”]. Y, unas líneas después, afirmar “*There is grandeur in this view of life, ...*”. Aunque tenemos estos precedentes, la teoría de redes complejas no vio la luz hasta finales de los años 50 del s. XX, de la mano de matemáticos interesados en topología y teoría de grafos<sup>[25]</sup>, como Paul Erdős y Alfred Rényi. Desarrollos posteriores a finales de los años 90, desde la mecánica estadística<sup>[26,27]</sup>

**FIGURA 3**  
 UNA DE LAS PRIMERAS REPRESENTACIONES DE UNA RED TRÓFICA, QUE EVIDENCIA EL PATRÓN DE RED DE INTERACCIONES ENTRE ESPECIES EN UN ECOSISTEMA, SE DEBE A LORENZO CAMERANO EN 1880<sup>[6,29]</sup>. UTILIZÓ UNA REPRESENTACIÓN AGREGADA CON DISTINTOS NIVELES TRÓFICOS, DESDE LA "VEGETACIÓN" HASTA LOS "ESCARABAJOS FITÓFAGOS" Y LOS "INSECTOS PARÁSITOS"



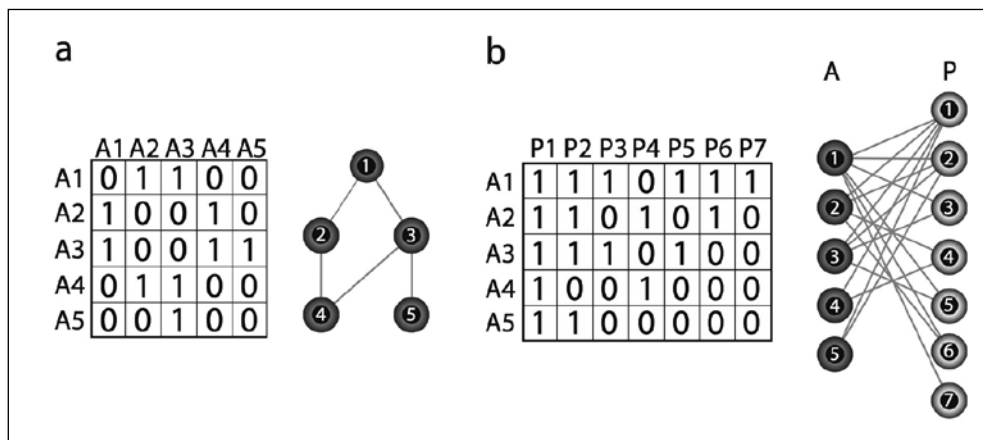
establecieron un sólido cuerpo de teoría para el estudio de las redes complejas, con un ámbito de aplicación enormemente amplio que va desde la biología, a ecología, energía y transporte, neurobiología, regulación génica, economía, etc. Como escribió evocadoramente Cohen<sup>[28]</sup> (“*Mathematics is biology’s next microscope, only better; biology is mathematics’ next physics, only better*”), las matemáticas son el nuevo “microscopio” de la biología, solo que mejor. Uno de nuestros microscopios aquí será la física de redes complejas, lo cual ilustra muy bien la utilidad de la teoría de redes para estudiar redes ecológicas complejas. A su vez, las redes mutualistas y otras redes ecológicas complejas abren nuevas áreas para la exploración conceptual en física: “la biología es la próxima física de las matemáticas, solo que mejor”<sup>[28]</sup>. En primer lugar, este “microscopio” nos permite visualizar su complejidad. En segundo lugar, nos proporciona herramientas para examinar su estructura. Finalmente, permite pruebas de hipótesis comparando datos empíricos con modelos nulos competidores construidos de acuerdo con algún principio básico. En los últimos veinticinco años mi investigación se ha centrado en el estudio de redes de interacciones ecológicas, y se ha llevado a cabo fundamentalmente con la colaboración de los profesores Jordi Bascompte (Univ. Zürich, Suiza) y Jens M. Olesen (Univ. Aarhus, Dinamarca), con el objetivo de trasvasar estas técnicas de la topología matemática y la mecánica estadística al estudio de sistemas ecológicos complejos.

Las redes tróficas representan “quién come a quién” en las comunidades ecológicas<sup>[8,30]</sup> y representan un precedente en ecología de redes de interacciones aunque para su estudio no se utilizasen inicialmente herramientas de la teoría de redes complejas. Probablemente la primera red trófica documentada fue por Lorenzo Camerano en 1880<sup>[6,29]</sup> (Fig. 3). Este autor italiano estaba motivado por la necesidad de determinar los efectos beneficiosos y perjudiciales de diferentes especies desde el punto de vista humano utilizando una representación agregada de la red alimentaria, con grupos de especies en diferentes compartimentos, en lugar de una representación individual del papel de cada especie. El análisis de Camerano es muy perspicaz, introduciendo conceptos como el equilibrio y la estabilidad de las abundancias de especies y los efectos en cascada a través de influencias indirectas entre especies. Cohen<sup>[29]</sup> sugiere que se inspiró y motivó por los diagramas anteriores utilizados por Darwin.

Una red es una representación visual (grafo) de una serie de elementos (nodos) unidos por enlaces que representan cualquier tipo de conexión entre tales elementos (Fig. 4). Así, por ejemplo, los mutualismos forman complejas redes de interdependencia entre docenas o incluso cientos de especies. Comprender la arquitectura de estas redes es muy importante para comprender la coevolución entre especies y la solidez de la red ante el cambio global. Técnicamente, existen dos tipos principales de redes, y la distinción es significativa en función del tema que tratamos aquí. Las redes de un modo único, representadas como grafos unipartitos, son aquéllas en las que sólo hay un tipo de nodo (por ejemplo, servidores informáticos o páginas *web*) para que dos de estos nodos puedan conectarse por un enlace. En ecología, los ejemplos serían las redes tróficas (Fig. 4a) y redes espaciales (p. ej., poblaciones contactadas por eventos de flujo génico entre ellas). Por otro lado, muchas interacciones de mutualismo, parasitismo, patógenos y hospedadores, etc., sólo se pueden representar por medio de una red de dos modos, con

FIGURA 4

(A) REPRESENTACIÓN MATRICIAL DE UN GRAFO UNIPARTITO, QUE ILUSTRAR UNA RED TRÓFICA (RED DE UN MODO), CON TODAS LAS INTERACCIONES REGISTRADAS ENTRE LAS CINCO ESPECIES. (B) REPRESENTACIÓN MATRICIAL DE UN GRAFO BIPARTITO QUE ILUSTRAR UNA RED DE INTERACCIONES DE DOS MODOS, ENTRE UN CONJUNTO DE ESPECIES ANIMALES (A; NODOS MÁS OSCUROS) Y UN CONJUNTO DE ESPECIES VEGETALES (P; NODOS MÁS CLAROS). LOS PANELES INCLUYEN LAS REPRESENTACIONES GRÁFICAS DE LAS DOS MATRICES DE ADYACENCIA. TANTO LAS REPRESENTACIONES MATRICIALES COMO LOS GRAFOS CORRESPONDIENTES PUEDEN SER CUALITATIVOS (CADA ELEMENTO  $A_{ij}$  DE LA MATRIZ Y ENLACE EN EL GRAFO, QUE ILUSTRAR LA PRESENCIA O AUSENCIA DE INTERACCIONES) O CUANTITATIVA (PONDERADA), CON ELEMENTOS MATRICIALES Y ENLACES DE GRAFO QUE ILUSTRAR ALGÚN ÍNDICE PONDERADO O CUANTITATIVO DE LA INTENSIDAD RELATIVA DE LAS INTERACCIONES



un grafo bipartito. Hay dos conjuntos de nodos, p. ej., plantas y animales, con interacciones entre conjuntos, pero no dentro de ellos (Fig. 4b). Otros ejemplos de redes de dos modos en ecología son los que representan las interacciones entre hospedadores y sus parasitoides, y algunas de ellas incluso son redes tripartitas con interacciones entre hospedadores, parasitoides y superparasitoides. Varios de nuestros trabajos han evidenciado regularidades muy significativas en la estructura de estas redes de interacciones, tanto para diferentes formas de interacción (polinización, dispersión de semillas, herbivoría, parasitismo, micorrizas, etc.) como para diferentes ecosistemas, desde el ártico a la pluviselva tropical y desde desiertos a arrecifes de coral. Estas "invariantes" de topología y estructura son de cuatro tipos: 1) distribuciones de grado; 2) encajamiento (*nestedness*); 3) asimetría de las interacciones; y 4) modularidad<sup>[10,31-39]</sup>.

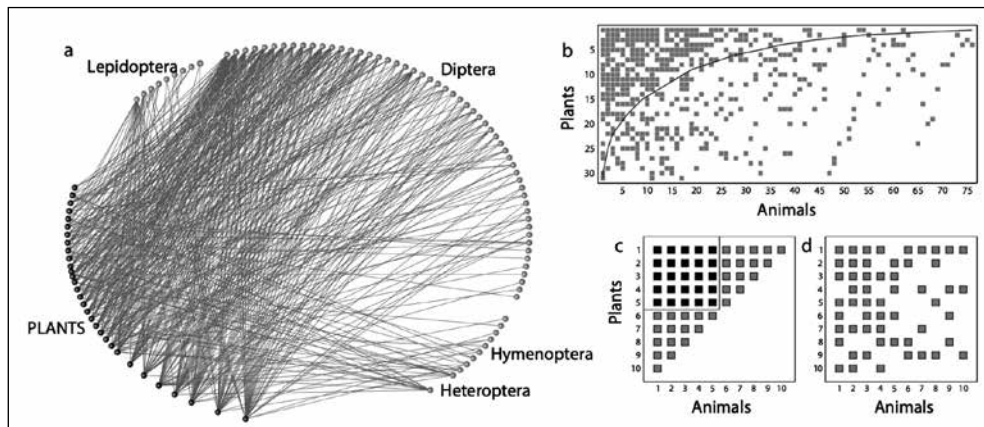
Las especies que conforman una red compleja (Fig. 4b) varían en el número de interacciones (enlaces que tienen) con otras especies. Este número de interacciones o enlaces por nodo de la red se conoce técnicamente como el grado,  $k$ . La distribución de frecuencias del número de interacciones por especie o distribución de grado generalmente se representa como una distribución de frecuencia del número de interacciones por especie o como una distribución de frecuencia acumulada del número de especies con al menos  $k$  interacciones. Pues bien, cuando exploramos<sup>[35]</sup> la distribución de co-

nectividad de 29 redes de polinizadores de plantas y 24 redes de animales frugívoros dispersores de semillas, la mayoría de las redes exhibieron distribuciones de ley de potencia de escala libre (*scale-free power law*), pero con algunas desviaciones significativas. El número de interacciones por especie varía mucho más entre especies de lo que que cabría esperar si tales interacciones se produjesen al azar. Aunque la mayor parte de las especies tienen algunas interacciones, unas pocas especies tienen un gran número de interacciones (aunque no tantas como para una red de escala libre). El truncamiento de las distribuciones de grados se ha atribuido generalmente a la acción de restricciones en la adición de enlaces por nodo a medida que la red crece, o también por ejemplo si existen restricciones de tipo biológico al número máximo de especies con las que una especie dada puede interactuar. Nuestros resultados<sup>[35]</sup> ilustraron la generalidad de las distribuciones de grado que siguen una ley de potencia libre de escala (*scale-free*), pero mostrando una caída con un marcado corte, es decir, distribuciones de ley de potencia truncadas o de escala amplia (*broad-scale*). Es decir, la probabilidad de encontrar especies con un número  $k$  de interacciones disminuye a medida que incrementa  $k$ , pero observándose una disminución brusca de esta probabilidad a partir de cierto valor de  $k$ . O sea, las especies supergeneralistas (valor alto de  $k$ ) son observables, pero mucho menos frecuentes de lo que cabría esperar si la distribución de grado estuviese gobernada por una ley de potencia libre de escala. Este tipo de distribución a menudo se llama distribución de Zipf cuando se trata de datos discretos (como en nuestro caso, donde analizamos la distribución del número de interacciones por especie,  $k$ ), o distribuciones de Pareto para el caso continuo<sup>[10,31]</sup>. Alrededor del 65,6% de las distribuciones de conectividad tanto para plantas como para animales siguieron esta distribución de escala amplia, mientras que el 22,2% de los casos se ajustaron mejor a una distribución libre de escala, y el resto se describió mejor por una distribución exponencial sin tipo definido de ajuste<sup>[35]</sup>. Estos resultados, sorprendentes dada la variedad de tipos de interacciones y ecosistemas incluidos en el estudio, muestran que deben existir limitaciones al grado de generalización que las interacciones de una especie determinada puedan alcanzar, por ejemplo si existen restricciones de tipo biológico. Es fácil imaginar que en una red de interacciones entre animales de vida libre y plantas, por ejemplo, encontremos tales limitaciones. Tal situación se da, por ejemplo, en especies de floración temprana (final de invierno o inicio de primavera) que, obviamente no interactuarán con insectos polinizadores que tengan fechas de vuelo a final de primavera o inicios de verano. O, por ejemplo, en el caso de aves frugívoras de pequeño tamaño, con picos más estrechos, que no pueden consumir frutos de tamaño muy grande y engullir y aprovechar eficientemente sus frutos. Estas interacciones, que es imposible observar entre ciertos pares de especies, son lo que hemos denominado interacciones prohibidas<sup>[10,34,36]</sup>; aquellos casos de no interacción entre especies que pueden ser explicados por alguna razón de limitación biológica como las ya citadas de fenología o tamaño. Es interesante que debido a estas interacciones prohibidas, siempre encontraremos ceros en las matrices de adyacencia (Fig. 4) ya que, independientemente del esfuerzo empleado en catalogar interacciones, se trata de interacciones que no acontecen en la naturaleza. Encontrar este tipo de regularidades en la topología de las redes ecológicas no es trivial, ya que una

serie de estudios teóricos han mostrado la relación que existe entre estas distribuciones de grado de escala amplia y la robustez de estas redes a las pérdidas de nodos, que serían equivalentes a situaciones de extinción de las especies componentes. Simplemente como resultado de estas formas no aleatorias de enlace entre especies, resultan configuraciones de la red completa que son mucho más robustas a la pérdida de especies que configuraciones aleatorias. Por tanto, estas redes no se configuran como una “madeja” desordenada de relaciones interespecíficas, sino como una estructura de características definidas y, en cierto modo, invariantes respecto al tipo de interacción o al ecosistema o hábitat o condiciones ambientales.

Otra propiedad relevante de la distribución de las interacciones ecológicas en estos conjuntos de especies de alta diversidad es el encajamiento (*nestedness*), que hace referencia a la forma en que se distribuyen esas interacciones entre especies. La idea de *nestedness* se desarrolló en el ámbito de la biogeografía de islas<sup>[40]</sup> para resaltar cómo dentro de un archipiélago un subconjunto de islas alcanzan mayor riqueza de especies y otras, más pobres en especies, cuya composición específica se encuentra ya represen-

**FIGURA 5**  
**GRÁFICO (A) Y REPRESENTACIÓN MATRICIAL (B) DE UNA RED DE INTERACCIONES PLANTA-POLINIZADOR EN EL ÁRTICO<sup>[41]</sup>. EL PATRÓN DE INTERACCIÓN (B) MUESTRA UN ENCAJAMIENTO SIGNIFICATIVO, CON LA MAYORÍA DE LAS INTERACCIONES POR PARES UBICADAS EN LA MATRIZ A LA IZQUIERDA DE UNA ISOCLINA DE ENCAJAMIENTO PERFECTO, COMO EN (C), QUE REPRESENTA UNA MATRIZ PERFECTAMENTE ENCAJADA. TAL PATRÓN EMPÍRICO SE DESVÍA NOTABLEMENTE DE UN PATRÓN ALEATORIO DE INTERACCIONES, COMO EN (D). EN UN PATRÓN ENCAJADO, LAS ESPECIES CON INTERACCIONES MÁS GENERALIZADAS TIENDEN A INTERACTUAR ENTRE SÍ, FORMANDO UN NÚCLEO EN LA MATRIZ DE INTERACCIÓN [RECUADRO EN (C)], MIENTRAS QUE UNA ESPECIE CON POCAS INTERACCIONES, DE MAYOR ESPECIFICIDAD, TIENDE A INTERACTUAR CASI EXCLUSIVAMENTE CON LAS ESPECIES EN EL NÚCLEO. EL PATRÓN ENCAJADO ES APRECIABLE VISUALMENTE EN (A), DADO QUE LOS NODOS SE HAN DISPUESTO EN NÚMERO DECRECIENTE DE INTERACCIONES PARA CADA GRUPO DE NODOS DE POLINIZADORES: LA DENSIDAD DE ENLACES DENTRO DEL GRAFO ELÍPTICO NO ES HOMOGÉNEA, PRÁCTICAMENTE SIN ENLACES ENTRE ESPECIES CON POCAS INTERACCIONES. LOS ENLACES OCURREN PREDOMINANTEMENTE ENTRE GENERALISTAS [RECUADRO EN (C)] Y ENTRE ESPECIALISTAS Y GENERALISTAS [CUADROS EN GRIS EN (C)]<sup>[38]</sup>.**





tada en las islas de mayor diversidad específica. De forma muy recurrente, de nuevo casi invariante, muchas redes de interacciones entre especies muestran distribuciones encajadas<sup>[38]</sup>, que se apartan significante de lo esperado a partir de modelos nulos. El resultado es que recurrentemente encontramos que, por ejemplo, el conjunto de animales que interactúan con una especie de planta (p. ej. fila #7, Fig. 5) se superpone- está incluido- con el conjunto de animales que interactúan con otra especie de planta (fila #3, Fig. 5), de tal manera que las especies de animales que interactúan con una especie determinada de planta forman un subconjunto propio de aquéllos que interactúan con especies de plantas más generalizadas. Denominamos encajamiento a este patrón por su analogía con las figuras de "muñecas rusas", en las que una muñeca grande guarda en su interior a una más pequeña, que a su vez contiene a otra aún más pequeña, hasta que encontramos finalmente una figura diminuta. Estudios posteriores<sup>[42]</sup> de tipo teórico y simulación han mostrado cómo el encajamiento es una propiedad que da estabilidad a las redes complejas y que, además resulta en una disposición óptima para albergar la mayor diversidad de interacciones dada la riqueza de especies incluida en la red.

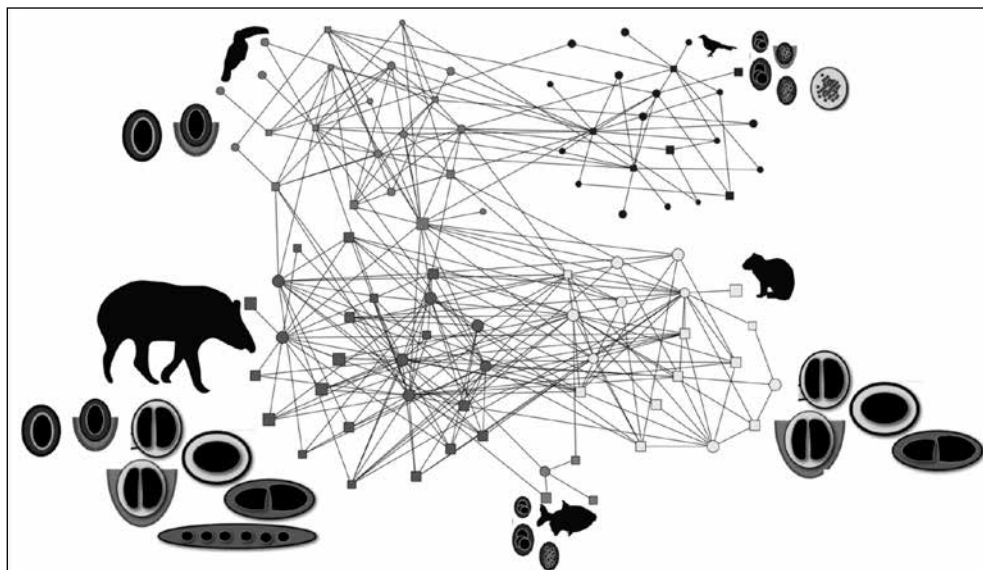
Una tercera propiedad, también generalizada, en redes ecológicas es la asimetría de las interacciones<sup>[34,39]</sup>. Representamos las interacciones entre especies como enlaces únicos entre pares de especies (Fig. 4), pero realmente cada uno de estos enlaces contiene dos relaciones de dependencia recíproca<sup>[34]</sup> que representan cuánto un animal depende de una planta (p. ej. para obtener energía y/o nutrientes para el mantenimiento diario de la demanda metabólica) y cuánto una planta depende de un animal (p. ej., para dispersar polen o semillas, determinando el éxito de la reproducción). Ello sólo es evidente cuando analizamos redes ponderadas, en las cuales los enlaces contienen información cuantitativa. Idealmente, el peso de una interacción debería describir el efecto per cápita de una especie en la especie con que interactúa. Desde un punto de vista práctico, esta información es muy difícil de obtener para un gran número de especies. Una medida de uso frecuente para el peso de interacción, o dependencia de una especie de otra, está proporcionada, por ejemplo, por la frecuencia relativa de visitas florales o la frecuencia relativa de los frutos consumidos<sup>[34,39]</sup>. Así, la dependencia de una planta de un ave frugívora, por ejemplo, se estima como la fracción de frutos consumidos por esa especie de ave en relación con el total de número de frutos consumidos por todas las especies animales. Del mismo modo, la dependencia del ave de la planta se estima como la fracción relativa de frutos consumidos por el animal que provienen de esa especie de planta en particular. La diferencia entre dos valores de dependencia en un par de especies, medidos en valor absoluto y normalizados, constituye un índice de asimetría en valores de dependencia recíproca entre las especies de ese par animal-planta<sup>[34]</sup>. En general encontramos distribuciones de frecuencia de dependencias que son fuertemente sesgadas a la derecha: gran número de dependencias son débiles (una especie depende poco de otra), y son muy infrecuentes (aunque existen) las relaciones en que la dependencia es alta. Eso conforma esta tercera propiedad de las redes ecológicas: las interacciones, de forma generalizada son débiles y, además, son fuertemente asimétricas<sup>[34,39]</sup>. En los pocos casos en los que una especie de planta, por ejemplo, depende en gran medida de una especie animal, ese animal tiende a depender muy poco de la planta<sup>[39]</sup>. Las interacciones débiles

y asimétricas pueden ayudar a los pares de especies mutualistas a coexistir, porque si tanto las plantas como los animales dependieran fuertemente el uno del otro, una disminución en la abundancia de las plantas sería seguida por una disminución similar en el animal, cuya abundancia, a su vez, retroalimentaría en la especie interactuante. En resumen, la mayoría de las interacciones entre pares de especies son débiles; las interacciones más fuertes son muy a menudo asimétricas, y las interacciones por pares que involucran fuertes dependencias mutuas son extremadamente raras.

Tanto la distribución fuertemente sesgada del grado de los nodos de una red, como la predominancia de interacciones débiles y la propiedad de asimetría de estas interacciones constituyen las características básicas de redes complejas disasortativas. La asortatividad de una red compleja se da cuando nodo de un grado dado tiene a interactuar con nodos de grado similar<sup>[44,45]</sup>, una propiedad típica de redes sociales. Es decir, cuando existe una correlación alta y positiva entre el grado  $k$  de cada nodo y el grado de los nodos a él conectados, como ocurre en las redes sociales con fuerte homofilia. No obstante, una buena parte de las redes biológicas tienden a una fuerte disasortatividad: nodos escasamente conectados tienen a conectarse a nodos que muestran gran número de

**FIGURA 6**

**ORGANIZACIÓN MODULAR DE UNA RED DE INTERACCIONES DE DISPERSIÓN DE SEMILLAS POR ANIMALES FRUGÍVOROS EN EL PANTANAL DE BRASIL. CÍRCULOS, ESPECIES ANIMALES; CUADRADOS, ESPECIES VEGETALES. EL TAMAÑO DEL CÍRCULO INDICA LA MASA CORPORAL ANIMAL (CÍRCULOS GRANDES QUE REPRESENTAN ESPECIES CON MASA CORPORAL  $\pm 4,5$  KG); EL TAMAÑO DE LOS CUADRADOS SE REFIERE AL DIÁMETRO DEL FRUTO (CUADRADOS GRANDES REPRESENTAN ESPECIES CON DIÁMETRO DE FRUTO  $\pm 9,5$  CM). LA RED INCLUYE CINCO MÓDULOS (DIFERENTES TONOS DE GRIS): DOS MÓDULOS DE AVES (ARRIBA), CADA UNO CON 22 ESPECIES; DOS MÓDULOS DOMINADOS POR MAMÍFEROS (ABAJO) CON 25 Y 18 ESPECIES, RESPECTIVAMENTE; Y UN MÓDULO DE PECES CON 4 ESPECIES<sup>[43]</sup>**



enlaces<sup>[44,46]</sup> (es decir, con correlaciones negativas de las distribuciones de grado). Dado que la mayoría de las redes observadas en el mundo real son altamente heterogéneas, con exponentes para sus distribuciones de grado  $k$  en el rango  $\gamma = 2-3$ , es de esperar que muestren una cierta disasortatividad, tanto más baja cuanto mayor es el grado  $k$ <sup>[46]</sup>. Esta propiedad probablemente tiene su origen último en que las redes con propiedades de distribución de grado libres de escala frecuentemente son disasortativas<sup>[46]</sup>. En redes de interacciones ecológicas entre especies de vida libre, como son los muchos mutualismos que estamos considerando como ejemplos<sup>[10]</sup>, tal vez es también el resultado esperado de interacciones entre especies que difieren ampliamente en abundancia: el resultado multiplicativo de dos distribuciones de dependencia fuertemente sesgadas necesariamente conduce a una distribución heterogénea de reciprocidad, con muchas interacciones de baja reciprocidad (baja simetría) y muy escasas interacciones de alta reciprocidad (alta simetría de dependencias)<sup>[34]</sup>.

Finalmente, la modularidad es otra propiedad de las redes complejas más allá de la descripción proporcionada por la distribución de grado  $k$  u otros descriptores como encajamiento. La modularidad es la tendencia de una red a organizarse en grupos distintivos de nodos, donde las especies (nodos) dentro de un módulo tienden a interactuar con una frecuencia mucho mayor entre ellas que con las especies de otros módulos<sup>[10,47]</sup>, como muestra nuestro estudio de interacciones de animales frugívoros y plantas en el Pantanal de S de Brasil, mostrado en la Fig. 6. Al igual que otras medidas de la arquitectura de red, describe un nivel más profundo de estructura que se centra no tanto en cuántas interacciones tiene un nodo, sino con qué otros nodos interactúa. Una red modular estaría organizada en módulos distintos en los que los nodos dentro de un módulo están muy interrelacionados, pero muestran pocas interacciones con los nodos de otros módulos (Fig. 6). Estos módulos también se llaman comunidades, compartimentos o camarillas en la literatura física, ecológica y social, respectivamente<sup>[10]</sup>. La modularidad tiene una relevancia central en redes complejas ya que puede representar un principio de diseño inherente<sup>[48]</sup>. Además, la identificación de módulos es un paso fundamental para comprender el funcionamiento de redes complejas<sup>[49]</sup>. Por ejemplo, la funcionalidad de los circuitos electrónicos integrados que componen redes tecnológicas complejas no se puede evaluar únicamente sobre la base de transistores individuales. Específicamente, la identificación de componentes funcionales como contadores, puertas o registros de turnos es fundamental para su diseño y uso efectivos<sup>[48]</sup>. Del mismo modo, en las redes biológicas moldeadas por la evolución, diferentes módulos podrían representar funcionalidades distintas, y una estructura modular puede ser óptima para hacer frente a las limitaciones incorporando rápidamente nuevas funcionalidades. Muchos de estos módulos, de hecho, agrupan muchos elementos o componentes de nivel inferior y a su vez forman parte de estructuras más complejas, frecuentemente ensambladas en redes jerárquicas<sup>[50]</sup>. Esta arquitectura jerárquica y modular también se observa en muchas redes biológicas y ecológicas<sup>[51]</sup>. Nuestros resultados indican que la mayoría de las grandes redes ecológicas son significativamente modulares. Cada uno de estos módulos incluye algunas especies con rasgos morfológicos convergentes de modo que, hasta cierto punto, el análisis de modularidad proporciona una forma cuantitativa y "de

abajo a arriba" de detectar posibles unidades coevolutivas. O sea, subgrupos de especies que interaccionan más entre sí que con el resto de especies en la red. Tales grupos de especies fuertemente interactuantes pueden considerarse como los componentes básicos de las redes mutualistas[47,52].

Otro aspecto interesante del análisis de modularidad es que podemos clasificar los "roles" de cada especie dentro de la red. En su artículo original, Guimerà y Amaral<sup>[49]</sup> clasificaron los nodos en relación con dos variables, el grado dentro del módulo,  $z_M$ , y el coeficiente de participación,  $c_M$ . El primero clasifica a las especies en términos de qué tan bien conectadas están dentro de su módulo. El segundo, por otro lado, mide la conectividad de un nodo desde la perspectiva de toda la red, midiendo qué tan bien distribuidos están los enlaces de un nodo entre todos los demás módulos. Así, en las redes de polinización, sólo alrededor del 11% de las especies (incluidos los escarabajos, las moscas y las abejas pequeñas y medianas) eran importantes desde el punto de vista de conectar varios módulos diferentes<sup>[47]</sup>. La importancia estas conexiones entre módulos deriva del hecho de que la desaparición de estas especies puede alterar en gran medida la estructura de toda la red, al perderse la conexión entre los módulos y avanzar hacia una situación en la que estos módulos estén más aislados entre sí. Estos aspectos son relevantes porque, en comparación con el análisis previo de la estructura de la red, identifica el papel de cada especie en la red. De hecho, proporciona un criterio objetivo para evaluar el papel de cada especie para el mantenimiento de toda la red de dependencias entre especies<sup>[47]</sup>.

Estas propiedades de estructura primaria (topológicas; grado) y secundaria (estructurales; encajamiento, modularidad) definen a las redes ecológicas como sistemas complejos conformados por múltiples partes (nodos) unidas entre sí por interacciones de diverso peso (enlaces). A pesar de su aparente complejidad, las redes mutualistas que he usado como ejemplo muestran patrones estructurales repetidos y universales, independientes de la composición de especies, el tamaño y otros detalles ecológicos. Revelan también redes cohesivas con propiedades de alta estabilidad dinámica, al menos mayor que lo cabe esperar en modelos nulos de estas mismas redes en los que implementamos ausencia de esas propiedades clave. ¿Cuáles son las claves de tal complejidad y qué retos representan para los esfuerzos de conservación que hemos de hacer en un futuro próximo para asegurar la salud del planeta?<sup>[20]</sup>.

### **PARTE III. COMPLEJIDAD Y LOS RETOS DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD**

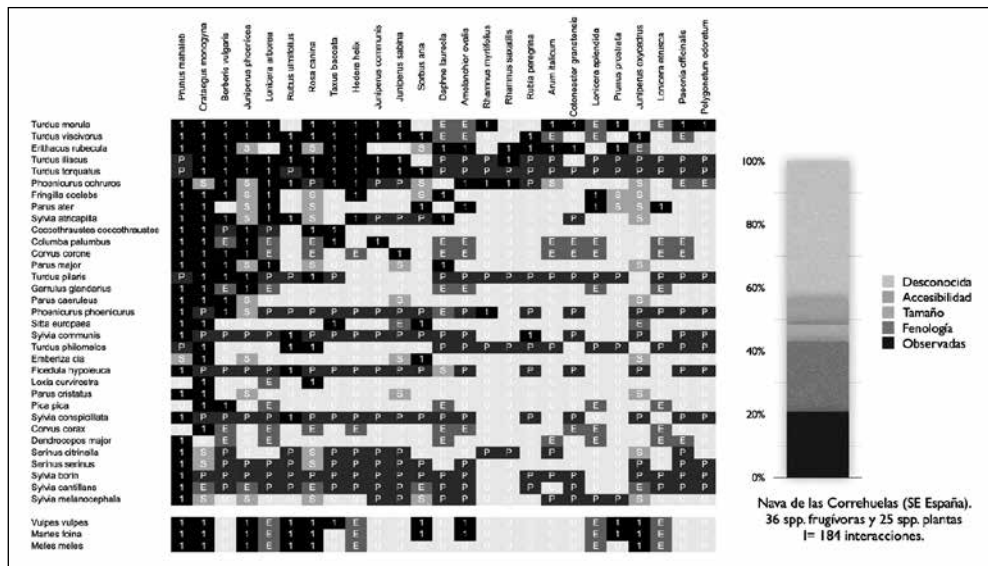
No sabemos cuántas especies hay en nuestro planeta. Las estimaciones de diversidad no-microbiana en la Tierra oscilan entre 3 y  $50 \times 10^6$  especies, con amplia incertidumbre para el número de especies de insectos, hongos, nematodos y organismos de profundidades marinas<sup>[53]</sup>. Hasta la fecha se han catalogado y dado nombre a unas  $1,73 \times 10^6$  especies, y aproximadamente se descubren unas  $18 \times 10^3$  especies/año. Estas cifras se refieren únicamente a especies de animales y plantas superiores<sup>[20,53-56]</sup>. Se estima que el

número total de especies superiores alcanza  $8,5 \times 10^6$  especies<sup>[56,57]</sup>. Si consideramos los microorganismos, estudios recientes establecen estimaciones que alcanzan  $10^{12}$  especies (un trillón, en numeración corta)<sup>[58]</sup>. Si la catalogación de las especies conlleva estos problemas y limitaciones, tanto o más lleva consigo el inventario de la diversidad de interacciones que se pueden encontrar entre ellas. Estas limitaciones son análogas a las de cualquier inventario de diversidad de especies que podamos acometer<sup>[11]</sup>: a medida que incrementamos el esfuerzo de muestreo, catalogaremos más y más interacciones no antes descubiertas entre pares de especies. En sistemas de interacción entre animales y plantas de vida libre (p. ej., polinización), el número de interacciones  $I$  aumenta muy rápidamente con el número de especies  $S$  ( $S = A + P$ ; el número de especies animales  $A$  y el número de especies de plantas), como vimos anteriormente (Fig. 2). No obstante,  $I$  no alcanza el máximo esperable  $A * P$  debido a que muchas interacciones no son posibles y realmente no acontecen en la naturaleza, lo que denominamos interacciones prohibidas<sup>[35,59]</sup> (Fig. 7). Además, si el muestreo es limitado y/o insuficiente,  $I$  resultará infraestimado<sup>[11]</sup>. El resultado, incluso en redes suficientemente muestreadas, es que encontramos redes dispersas (*sparse networks*), caracterizadas por una baja conectancia<sup>[34,60]</sup>. La conectancia de una red es, simplemente, la proporción de interacciones realizadas respecto al total posible. Aproximadamente para un 40% de las interacciones no observadas cabe esperar que causas biológicas como desajustes de la fenología o limitaciones de tamaño expliquen porqué no observamos esas interacciones (Fig. 7). Para aproximadamente otro 40% desconocemos porque no las hemos observado, aunque en redes bien muestreadas<sup>[11]</sup> cabe descartar que sea debido a insuficiencia de muestreo. Muy posiblemente se trata de pares de especies cuya probabilidad real de encuentro en la naturaleza (*PIE*, probabilidad de encuentro interespecífico<sup>[11,61]</sup>) es extremadamente baja, por ejemplo si son dos especies localmente raras; o bien puede tratarse de razones biológicas no conocidas (preferencias parciales, toxicidad, etc.).

Estos elementos son característicos de sistemas complejos, formados por elementos diversos que se enlazan por una serie limitada de interacciones entre ellos, de todas las posibles, siendo éstas interacciones débiles y asimétricas, apartándose mucho de configuraciones aleatorias (Fig. 8)<sup>[62]</sup>. La complejidad emerge por tanto no de las características propias de los elementos (nodos) de la red, sino de la forma en que están enlazados. Dependiendo del espacio de parámetros definido por la aleatoriedad de la estructura, la heterogeneidad de la distribución de grado y la modularidad, diferentes tipos de redes reales se reparten de acuerdo con sus propiedades topológicas y estructurales. Para las redes metabólicas o genéticas se ha sugerido<sup>[62]</sup>, que esta combinación de características (no-aleatoriedad, alta heterogeneidad, estructuración en módulos) podría ser importante para reducir el impacto de retroalimentaciones positivas inestables, una condición que puede satisfacerse mediante grafos dispersos (*sparse networks*) que muestran una arquitectura cuasi- o libre de escala, tal y como discutimos anteriormente para redes complejas de interacciones mutualistas planta-animal.

Ante el ritmo sostenido de degradación de la Biosfera y su biodiversidad<sup>[20,22]</sup> es muy urgente entender los principios que gobiernan la evolución y dinámica de redes complejas de interacciones ecológicas<sup>[13]</sup>; al menos por dos razones: 1) conocer con

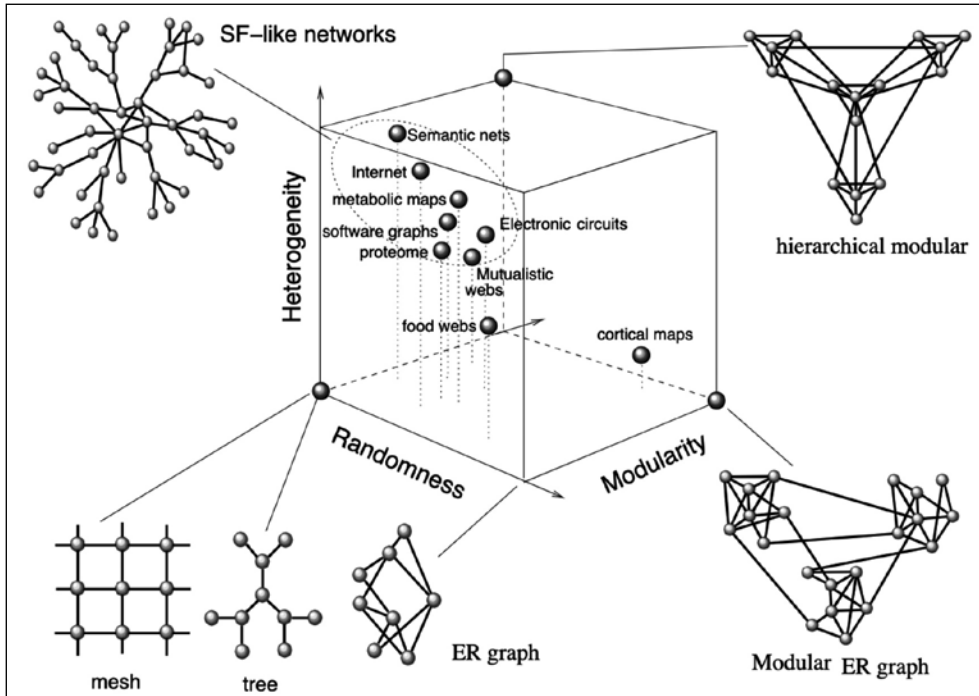
**FIGURA 7**  
**MATRIZ DE ADYACENCIA REPRESENTANDO LAS INTERACCIONES ENTRE UNA SERIE DE**  
**ESPECIES ANIMALES FRUGÍVORAS (FILAS) Y PLANTAS CON FRUTO CARNOSO (COLUMNAS)**  
**EN EL PARQUE NAT. DE LAS SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS (JAÉN).**  
**LAS INTERACCIONES OBSERVADAS ESTÁN MARCADAS CON 1 Y EN NEGRO; LAS**  
**INTERACCIONES DE COLOR SON NO OBSERVADAS, POR DIFERENTES RAZONES BIOLÓGICAS**  
**(ETC.), EN AMARILLO, LA RAZÓN PARA NO REGISTRAR LA INTERACCIÓN ES DESCONOCIDA,**  
**PERO NO ATRIBUIBLE A LIMITACIONES DE MUESTREO.<sup>[11,59]</sup> SE REPRESENTA (BARRA) EL %**  
**DE AUSENCIAS DE INTERACCIÓN EXPLICADO POR CADA CAUSA**



precisión los subconjuntos de nodos (especies) e interacciones que soportan que son fundamentales para garantizar la resiliencia de las redes, y dirigir a ellos los esfuerzos de conservación y 2) poder diseñar técnicas eficientes y rápidas de restauración de redes complejas con toda su funcionalidad, lo cual no equivale a diseñar simples técnicas de restauración de especies.

Las implicaciones de todo lo anterior inciden en las condiciones de estabilidad de estas redes: cómo de robusta es la estructura y dinámica de la red a pérdidas de nodos. El estudio de redes biológicas ha mostrado regularidades recurrentes en su dinámica y en sus propiedades de estabilidad<sup>[63,64]</sup>. Estas redes biológicas son sumamente robustas (homeostáticas) a pérdida aleatoria de nodos (especies), pero más frágiles a pérdidas sucesivas de las especies más centrales de la red (p. ej. si procesos de cambio global afectan más a las especies más centrales de la red)<sup>[10,65]</sup>. El hecho de que un 65,6% de redes complejas de mutualismos examinadas exhiben estructuras de escala-amplia (distribuciones de frecuencia *broad-scale*, truncadas, de conectividad de los nodos) intermedias entre configuraciones aleatorias y distribuciones libres de escala, *scale-free*, las dota de una mayor estabilidad ante pérdida selectiva de nodos que las redes libres de

**FIGURA 8**  
**ESPACIO CUALITATIVO DE VARIACIÓN DE TIPOS DE REDES, EN RELACIÓN A TRES**  
**CARACTERÍSTICAS: ALEATORIEDAD (CANTIDAD DE ALEATORIEDAD EN EL PROCESO DE**  
**CONSTRUCCIÓN DE LA RED), HETEROGENEIDAD (VARIANZA DE LA DISTRIBUCIÓN DE**  
**GRADO,  $k$ ) Y MODULARIDAD (CÓMO DE MODULAR ES LA ESTRUCTURA). LA POSICIÓN DE**  
**LOS DIFERENTES EJEMPLOS ES SOLO UNA GUÍA VISUAL. EL DOMINIO DE LAS REDES**  
**JERÁRQUICAS ALEATORIAS ALTAMENTE HETEROGÉNEAS (PUNTEADO; REDES SF,**  
**CUASI ESCALA-LIBRE) PARECE MUCHO MÁS OCUPADO QUE OTRAS ÁREAS DEL ESPACIO.**  
**MODIFICADO DE <sup>[62]</sup>.**



escala<sup>[10,35,66]</sup>. La estructura peculiar deriva, como vimos, del proceso de crecimiento y evolución de la red: nuevas especies se adicionan por interacción preferencial con las ya más conectadas (generalistas) pero con limitaciones del máximo grado  $k$  que pueden alcanzar y, por tanto impidiendo que la red alcance topologías de escala libre<sup>[66]</sup>. Trabajos posteriores<sup>[67]</sup> han mostrado cómo otras propiedades como encajamiento y modularidad están muy asociadas a mayor estabilidad estructural de estas redes mutualistas. Esto es, un sistema será más estable estructuralmente si tiene una mayor gama de condiciones compatibles con un estado estable cualitativo dado. Las analogías con sistemas socioeconómicos son obvias y han puesto de manifiesto cómo es necesario evaluar las condiciones de estabilidad estructural de los sistemas económicos<sup>[68]</sup>. No debemos detenernos sólo en entender si pequeñas perturbaciones cuando un sistema está en un estado cuantitativo dado empujarán al sistema permanentemente a un estado cuantitativo diferente (estabilidad dinámica). En condiciones de un mundo rápidamente cambiante en la

distribución y disponibilidad de recursos estos modelos de estabilidad estructural no se detienen en examinar un estado estacionario en particular, sino también en considerar si existe una familia de estados cuantitativos que puedan garantizar la sostenibilidad<sup>[67,68]</sup>. Las analogías con sistemas socioeconómicos son obvias y han puesto de manifiesto cómo es necesario evaluar las condiciones de estabilidad estructural de los sistemas económicos. A raíz de nuestro trabajo en 2007<sup>[39]</sup> sobre estructura de redes ecológicas, May, Levin y Sugihara publicaron un ensayo en *Nature*<sup>[69]</sup> poniendo énfasis en la relevancia de estas invariantes estructurales de las redes de transacciones económicas y flujos interbancarios que dan soporte a nuestro sistema económico<sup>[70]</sup>. Del mismo modo que para nuestros sistemas ecológicos de alta diversidad, una pregunta clave sobre los sistemas socioeconómicos es cuánta variación puede soportar tal sistema sin ser expulsado de un comportamiento estable cualitativo.

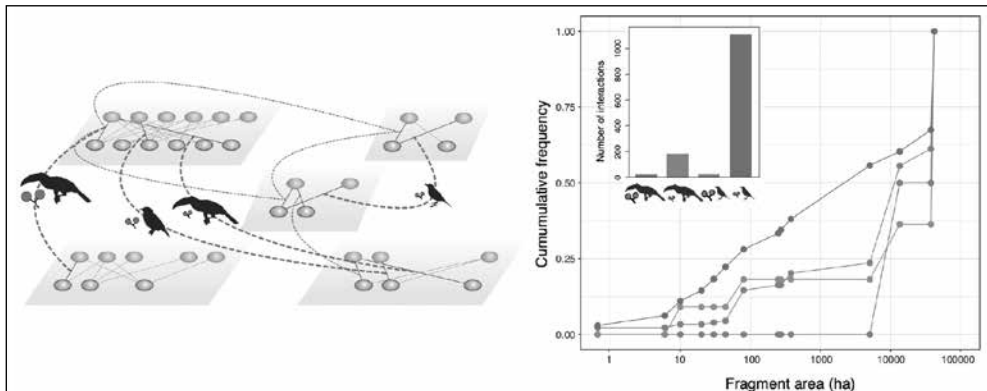
En este escenario de retos de conservación de la Biodiversidad a escala planetaria el problema se presenta difícil. Además de las dificultades ya señaladas para el estudio y catalogación de la Biodiversidad en todas sus facetas (número de especies, acervo genético, interacciones ecológicas con servicios ecosistémicos) hay que añadir la dificultad de examinar exhaustivamente la tupida red de interacciones en este tipo de redes complejas: lo que Koch<sup>[18]</sup> denomina "*el freno de la complejidad*". Tal freno no sólo está presente ante nuestro conocimiento de sistemas complejos como las redes de regulación génica, las redes de conexiones neuronales, la red metabólica celular (interacciones proteína-proteína), etc.; también se nos presenta para diseñar y desarrollar tecnologías de conservación y restauración de ecosistemas funcionales que alojan una miríada de interacciones de alto valor ecológico.

Estudios recientes han mostrado cómo las extinciones de las interacciones frecuentemente preceden a la pérdida (extinción local) de las especies<sup>[71]</sup>. Daniel Janzen<sup>[72]</sup> lo expresa enfáticamente: "*what escapes the eye, however, is a much more insidious kind of extinction: the extinction of ecological interactions*". En efecto, la pérdida (extinción) de una función ecológica que se deriva de una interacción (p. ej., dispersión de semillas a muy larga distancia por grandes animales frugívoros) acontece bastante antes de que se pierda la especie. Por ejemplo, en un fragmento de bosque tropical aún podemos registrar tucanes o pavones en un muestreo de diversidad de aves frugívoras, pero en tan baja densidad que no presentan funcionalidad en la dispersión de plantas con grandes semillas, cuyos frutos invariablemente quedan sin ser consumidos y las semillas acaban depredadas. La pérdida de hábitat y la sobre-caza que van normalmente asociadas en la degradación de las selvas tropicales hacen disminuir las densidades locales de estas especies a niveles que las hace funcionalmente irrelevantes (Fig. 9)<sup>[73]</sup>. Las interacciones que involucran especies de gran tamaño se pierden en fragmentos <10 000 ha, lo que indica un fuerte filtrado de la diversidad funcional de las interacciones plantas-frugívoros a causa de la fragmentación del hábitat. Las interacciones que persisten involucran sólo a especies de plantas de pequeña semilla y crecimiento rápido, de etapas tempranas de la sucesión, y a especies de aves generalistas de pequeño tamaño corporal capaces de cruzar el paisaje fragmentado. Este subconjunto reducido de interacciones forma los componentes de la metared que persisten a la defaunación y la fragmentación, y causa



FIGURA 9

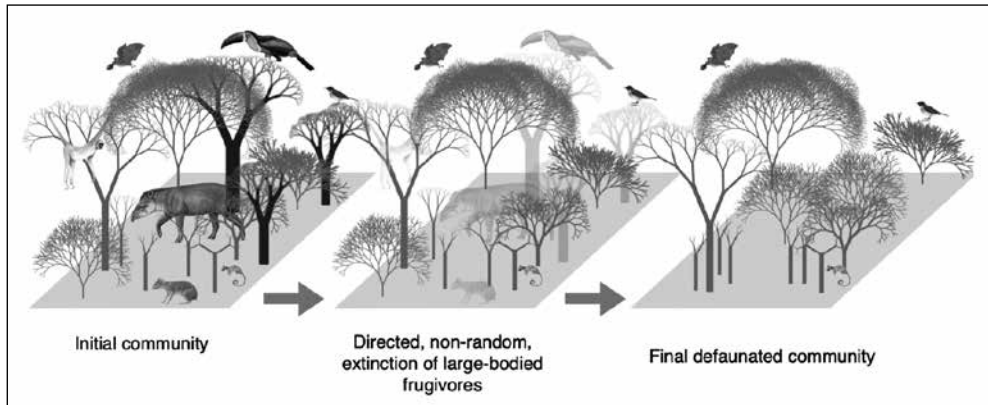
IZQUIERDA: UNA METARED ESPACIAL DE INTERACCIONES PLANTA-AVES FRUGÍVORAS EN LA MATA ATLÁNTICA DEL SE DE BRASIL<sup>[73]</sup>. LAS ÁREAS GRISAS REPRESENTAN DISTINTOS FRAGMENTOS DE BOSQUE DE DISTINTO TAMAÑO Y AISLAMIENTO, QUE PUEDEN ESTAR POTENCIALMENTE CONECTADOS POR LA ACTIVIDAD Y DESPLAZAMIENTOS DE LOS FRUGÍVOROS (DISPERSIÓN A LARGA DISTANCIA). CADA FRAGMENTO DE BOSQUE INCLUYE UNA RED LOCAL CON LOS CONJUNTOS LOCALES DE ESPECIES DE AVES (NODOS NARANJAS), ESPECIES DE PLANTAS (NODOS VERDES) Y SUS INTERACCIONES (LÍNEAS GRISAS DENTRO DE LAS REDES). LOS ENLACES AZULES PUNTEADOS INDICAN INTERACCIONES POR PARES QUE APARECEN REPETIDAMENTE EN AL MENOS DOS REDES LOCALES (ENLACES ROJOS EN ENSAMBLAJES LOCALES), ACTUANDO ASÍ POTENCIALMENTE COMO ENLACES MÓVILES EN TODO EL PAISAJE. LAS SILUETAS INDICAN INTERACCIONES DE PARES DE ESPECIES QUE PUEDEN INVOLUCRAR, POR EJEMPLO, AVES Y FRUTOS DE DIFERENTE TAMAÑO. ESAS INTERACCIONES REDUNDANTES A ESCALA PAISAJÍSTICA CONFORMAN UNA METARED DE FRAGMENTOS DE BOSQUE CONECTADOS POR LAS INTERACCIONES QUE COMPARTEN. ESAS INTERACCIONES CENTRALES PUEDEN FUNCIONAR POTENCIALMENTE COMO ENLACES MÓVILES ENTRE FRAGMENTOS DE BOSQUES. DERECHA: FRECUENCIAS DE CUATRO GRUPOS FUNCIONALES DE INTERACCIONES AVES-FRUTOS EN RELACIÓN CON EL ÁREA DEL FRAGMENTO. EL RECUADRO MUESTRA EL NÚMERO DE INTERACCIONES POR PARES REGISTRADAS EN LA METARED QUE INCLUYEN: (1) FRUGÍVOROS GRANDES/PLANTA DE SEMILLAS GRANDES (ROJO); (2) FRUGÍVOROS GRANDES/PLANTA DE SEMILLAS PEQUEÑAS (VERDE); FRUGÍVOROS PEQUEÑOS/PLANTA DE SEMILLAS GRANDES (AZUL); Y (4) FRUGÍVOROS PEQUEÑOS/PLANTA DE SEMILLAS PEQUEÑAS (MORADO). LAS LÍNEAS MUESTRAN LA PROPORCIÓN ACUMULADA DE INTERACCIONES DE CADA GRUPO QUE SE DAN EN FRAGMENTOS DE ÁREA CRECIENTE; CADA PUNTO INDICA LA PROBABILIDAD DE APARICIÓN DE UNA INTERACCIÓN EN UN GRUPO DADO EN UN FRAGMENTO TAN GRANDE O MENOR QUE EL ÁREA CORRESPONDIENTE. LOS GRUPOS FUNCIONALES SE CLASIFICARON DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN POR PARES DE MASA CORPORAL (G) DE LAS AVES FRUGÍVORAS Y EL DIÁMETRO DE LA SEMILLA (MM) DE LAS ESPECIES DE PLANTAS INVOLUCRADAS EN LA INTERACCIÓN. EL UMBRAL PARA ESTABLECER GRANDES ESPECIES DE AVES FUE LA MASA CORPORAL > 100 G, Y PARA LAS SEMILLAS GRANDES UTILIZAMOS UN DIÁMETRO DE SEMILLA >12 MM<sup>[73]</sup>.



déficits a largo plazo de capacidad de almacenamiento de carbono, al tiempo que retrasa la regeneración forestal a escala de paisaje. A largo plazo, el predominio de especies de pequeño tamaño en fragmentos forestales, por la extinción local de las interacciones de especies frugívoras más grandes puede seleccionar a favor de plantas de frutos y semillas más pequeñas<sup>[74]</sup>. Un efecto funcional negativo de esta selección hacia las especies de plantas de semilla pequeña es que generalmente se asocian para reducir la capacidad

FIGURA 10

EFFECTOS DE LA DEFAUNACIÓN DE ANIMALES FRUGÍVOROS EN EL POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA SELVA PLUVIAL ATLÁNTICA DEL SE DE BRASIL<sup>[75]</sup>. LA PÉRDIDA DE BOSQUE Y LA SOBRE-CAZA CAUSAN EXTINCIÓN SELECTIVA DE LAS ESPECIES DE FRUGÍVOROS DE MAYOR TAMAÑO (TAPIRES, PAVONES, TUCANES, GRANDES PRIMATES). ÉSTAS SON LAS QUE PUEDEN DISPERSAR SEMILLAS DE GRAN TAMAÑO, QUE SON PRECISAMENTE LAS DE PLANTAS CON MADERA DE MAYOR DENSIDAD Y MAYOR CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO. EN ÁREAS DEFAUNADAS SÓLO PERSISTEN PEQUEÑOS FRUGÍVOROS QUE SÓLO DISPERSAN EFICIENTEMENTE LAS SEMILLAS DE PLANTAS DE ETAPAS PIONERAS DE LA SUCESIÓN, DE MADERA MENOS Densa Y MUCHA MENOS CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO. LAS SIMULACIONES DE EXTINCCIONES LOCALES DE ÁRBOLES ASOCIADAS A LA DEFAUNACIÓN DE UN FRAGMENTO (PÉRDIDA DE ESPECIES ARBÓREAS CON SEMILLA  $\geq 12,0$  MM) RESULTARON EN PÉRDIDAS DE POTENCIAL ALMACENAMIENTO DE CARBONO SIGNIFICATIVAMENTE MAYORES QUE LAS SIMULACIONES DE EXTINCIÓN ALEATORIA (ES DECIR, PÉRDIDA DE ESPECIES ARBÓREAS INDEPENDIENTE DEL TAMAÑO DE LA SEMILLA). EN AZUL OSCURO, ÁRBOLES DE MADERA DURA, CON SEMILLAS GRANDES ( $\geq 12,0$  MM); AZUL CLARO, OTRAS ESPECIES DE ÁRBOLES, EN SU MAYORÍA DE CRECIMIENTO SECUNDARIO EN ÁREAS ABIERTAS<sup>[75]</sup>. APROXIMADAMENTE UN 18% DE LAS ESPECIES ÁRBOLES DE LA SELVA PLUVIAL ATLÁNTICA TIENE SEMILLAS  $> 18$  MM DE DIÁMETRO.



de almacenamiento de carbono, lo que puede conducir a un déficit generalizado en el balance de carbono en relación con los bosques semiprístinos<sup>[75]</sup>. Los cambios documentados en las interacciones planta-aves frugívoras debidos a la defaunación y a la fragmentación del hábitat causan cambios en la vegetación de la selva Atlántica, imponiendo largos retrasos para la recuperación forestal y para la integración funcional de fragmentos de selva (Fig. 10). Aunque las políticas intergubernamentales para reducir las emisiones de carbono y los programas de reforestación se han centrado principalmente en la deforestación, estos resultados demuestran que la defaunación y la extinción de interacciones ecológicas clave también plantean un grave riesgo para mantener la capacidad de almacenamiento de carbono de los bosques tropicales.

## SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

Tradicionalmente el estudio de la Biodiversidad se ha centrado en la cuantificación y estima del número de especies y la distribución de las abundancias entre ellas<sup>[76,77]</sup>.

Los bosques tropicales en todo el mundo almacenan >460.000 millones de toneladas de carbono, más de la mitad del almacenamiento atmosférico total, y la conversión y degradación de los bosques tropicales representan hasta el 20% de las emisiones antropogénicas mundiales de gases de efecto invernadero<sup>[78]</sup>. Ello representa una pérdida de un servicio clave que supera con creces cualquier estima que podamos derivar si como pérdida de Biodiversidad sólo evaluamos la pérdida de especies. Tengamos en cuenta que >85% de las especies leñosas tropicales dependen de los animales frugívoros para la dispersión de sus semillas; en promedio, en el bosque Mediterráneo de nuestras latitudes tal síndrome de dispersión corresponde a un 52-64% de las especies, dependiendo de la localidad concreta<sup>[79]</sup>. O sea, el colapso de los procesos de dispersión de semillas, al igual que la actual crisis de la polinización de las flores, lleva al colapso de la regeneración natural en los bosques. Esta extinción de interacciones se presenta a menudo como una forma de extinción “críptica”, o sea, sumamente difícil de detectar y de evaluar<sup>[71]</sup>. En 1992, Redford<sup>[80]</sup> acuñó el término “*síndrome del bosque vacío*” para ilustrar el problema que discutimos desde una perspectiva de biología de la conservación: “*No debemos dejar que un bosque lleno de árboles nos engañe para que creamos que todo está bien. Muchos de estos bosques están “muertos vivos” (Janzen 1988) y, aunque los satélites que pasan por encima pueden registrarlos realmente como bosques, están vacíos de gran parte de la riqueza faunística valorada por los humanos. Un bosque vacío es un bosque condenado*”.

Permítanme concluir con una breve reflexión. Nos resulta fascinante la enorme variedad de detalles que podemos admirar en la historia natural de las interacciones bióticas, algo que ya resaltaba Charles Darwin en sus escritos. A pesar de esta desalentadora cantidad de detalles (si pretendiésemos conocerlos todos), no deberíamos quedar atrapados en un escenario reduccionista que nos impida el análisis de los patrones globales de complejidad<sup>[81]</sup>. Necesitamos urgentemente un enfoque interdisciplinario para abordar este desafío. He revisado algunas herramientas básicas e ilustrado su aplicación con ejemplos de interacciones mutualistas entre plantas y animales. Y es evidente que la ecología como ciencia ha dado pasos de gigante en estos ámbitos: la consideración de los ecosistemas como sistemas adaptativos complejos (CAS)<sup>[66,81]</sup>. El ritmo de destrucción de naturaleza y de pérdida de biodiversidad es incesante<sup>[20-22]</sup>, y requerimos urgentemente desarrollar métodos de detección temprana de cambios en los ecosistemas antes de que éstos resulten irreversibles.

He dicho.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] GARCÍA-CAMARERO, E. Y GARCÍA-CAMARERO, E. 1994. La polémica de la ciencia española. Alianza Editorial. Madrid.
- [2] HAECKEL, E. 1866. *Generelle Morphologie der Organismen [The general morphology of organisms]*. vol. 2. Berlin, Germany: Georg Reimer.
- [3] VON UEXKÜLL, J. 1926. *Theoretical Biology*. New York: Harcourt, Brace & Co.
- [4] FECYT 2020. Indicadores del sistema español de ciencia, tecnología e innovación. FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología), Madrid. [<https://www.fecyt.es/es/publicacion/indicadores-del-sistema-espanol-de-ciencia-tecnologia-e-innovacion-2020>]
- [5] GARCÍA NOVO, F., 2009, La implantación de la Ecología en España. En: Ciencia y Tecnología, C. Sánchez del Río, E. Muñoz y E. Alarcón Eds. España Siglo XXI. Biblioteca Nueva, Madrid, 4:205-242.
- [6] EGERTON, F.N. 2007. Understanding food chains and food webs, 1700-1970. *Bulletin of the Ecological Society of America* 88: 50-69.
- [7] DARWIN, C. 1860. *The origin of species by means of natural selection, or, The preservation of favored races in the struggle for life*. John Murray. London, UK.
- [8] COHEN, J.E. 1978. *Food webs and niche space*. Princeton University Press. Princeton, NJ.
- [9] THOMPSON, J.N. 1982. *Interaction and coevolution*. Wiley, New York, USA.
- [10] BASCOMPTE, J. Y JORDANO, P. 2014. *Mutualistic networks*. Princeton University Press. Princeton, NJ, USA.
- [11] JORDANO, P. 2016. Sampling networks of ecological interactions. *Functional Ecology* 30: 1883-1893.
- [12] JORDANO, P. 1987. Patterns of mutualistic interactions in pollination and seed dispersal: connectance, dependence asymmetries, and coevolution. *American Naturalist* 129: 657-677.
- [13] THOMPSON, J.N. 2009. The coevolving web of life. *American Naturalist* 173: 125-140.
- [14] QUINTERO, E., ISLA, J. Y JORDANO, P. 2021. Methodological overview and data-merging approaches in the study of plant–frugivore interactions. *Oikos* e08379: 2022; en prensa.
- [15] DOMENICO, M.D. 2017. Multilayer modeling and analysis of human brain networks. *Gigascience* 6: 1-8.
- [16] BALDUZZI, D. Y TONONI, G. 2008. Integrated information in discrete dynamical systems: motivation and theoretical framework. *PLoS Computational Biology* 4: e1000091-18.
- [17] SÁNCHEZ, C. Et al. 1999. Grasping at molecular interactions and genetic networks in *Drosophila melanogaster* using FlyNets, an Internet database. *Nucleic Acids Research* 27: 89-94.
- [18] KOCH, C. 2012. Modular biological complexity. *Science* 337: 531-532.
- [19] Koch, C. y Laurent, G. 1999. Complexity and the nervous system. *Science* 284: 96-98.
- [20] IPBES. 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E.S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, y H.T. Ngo (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Alemania. URL: <https://ipbes.net/global-assessment>.
- [21] BARNOSKY, A.D. et al. 2012. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 470: 51-57.
- [22] BARNOSKY, A.D. et al. 2012. Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature* 486: 52-58.
- [23] BIGGS, R. et al. 2009. Turning back from the brink: Detecting an impending regime shift in time to avert it. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 106: 826-831.
- [24] JONSSON, P.F. et al. 2006. Global topological features of cancer proteins in the human interactome. *Bioinformatics* 22: 2291-2297.
- [25] Erdős, P. y Rényi, A. 1959. On random graphs. *Publications in Mathematics*. 6, 290-297.
- [26] BARABÁSI, A.L. y ALBERT, R. 1999. Emergence of scaling in random networks. *Science* 286: 509-512.

- [27] NEWMAN, M.E.J. 2003. The structure and function of complex networks. *SIAM Review* 45: 167-256.
- [28] COHEN, J.E. 2004. Mathematics is biology's next microscope, only better; biology is mathematics' next physics, only better. *PLoS Biology* 2: 2017-2023.
- [29] COHEN, J.E. 1994. Lorenzo Camerano's contribution to early food web theory. En S. Levin, ed., *Frontiers in mathematical biology*. Springer-Verlag, Berlin.
- [30] MAY, R.M. 1973. *Stability and complexity in model ecosystems*. Princeton University Press, Princeton.
- [31] BASCOMPTE, J., Y JORDANO, P. 2007. Plant-animal mutualistic networks: The architecture of biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 38: 567-593.
- [32] FORTUNA, M.A., STOUFFER, D.B., OLESEN, J.M., JORDANO, P., MOUILLOT, D., KRASNOV, B.R., POULIN, R., Y BASCOMPTE, J. 2010. Nestedness versus modularity in ecological networks: Two sides of the same coin? *Journal of Animal Ecology* 79: 811-817.
- [33] GUIMARÃES, P. R., JR., JORDANO, P., Y THOMPSON, J.N. 2011. Evolution and coevolution in mutualistic networks. *Ecology Letters* 14: 877-885.
- [34] JORDANO, P. 1987. Patterns of mutualistic interactions in pollination and seed dispersal: Connectance, dependence asymmetries, and coevolution. *American Naturalist* 129: 657-677.
- [35] JORDANO, P., BASCOMPTE, J., Y OLESEN, J.M. 2003. Invariant properties in coevolutionary networks of plant-animal interactions. *Ecology Letters* 6: 69-81.
- [36] JORDANO, P., BASCOMPTE, J., Y OLESEN, J.M. 2006. The ecological consequences of complex topology and nested structure in pollination webs. En: N. M. Waser, y J. Ollerton, eds., *Plant-pollinator interactions. From specialization to generalization*, págs. 173-199. University of Chicago Press, Chicago.
- [37] JORDANO, P., VÁZQUEZ, D., Y BASCOMPTE, J. 2009. Redes complejas de interacciones planta-animal. En: R. Medel, R. Zamora, M. Aizen, and R. Dirzo, eds., *Interacciones planta-animal y la conservación de la Biodiversidad*, págs. 17-41. CYTED, Madrid.
- [38] BASCOMPTE, J., JORDANO, P., MELIÁN, C.J., Y OLESEN, J.M. 2003. The nested assembly of plant-animal mutualistic networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 100: 9383-9387.
- [39] BASCOMPTE, J., JORDANO, P., Y OLESEN, J.M. 2006a. Asymmetric coevolutionary networks facilitate biodiversity maintenance. *Science* 312: 431-433.
- [40] PATTERSON, B.D. Y ATMAR, W. 1986. Nested subsets and the structure of insular mammalian faunas and archipelagos. *Biological Journal of the Linnean Society* 28: 65-82.
- [41] OLESEN, J.M., BASCOMPTE, J., ELBERLING, H., Y JORDANO, P. 2008. Temporal dynamics in a pollination network. *Ecology*. 89: 1573-1582.
- [42] ROHR, R.P., SAAVEDRA, S., Y BASCOMPTE, J. 2014. Ecological networks. On the structural stability of mutualistic systems. *Science* 345: 1253497.
- [43] DONATTI, C.I., GUIMARÃES JR., P.R., GALETTI, M., PIZO, M.A., MARQUITTI, F.M.D., Y DIRZO, R. 2011. Analysis of a hyper-diverse seed dispersal network: Modularity and underlying mechanisms. *Ecology Letters* 14: 773-781.
- [44] NEWMAN, M.E.J. 2002. Assortative mixing in networks. *Physical Review Letters* 89 (20): 208701.
- [45] BARABÁSI, A.L. 2019. *Network science*. Cambridge University Press, Cambridge, NJ, EEUU.
- [46] JOHNSON, S., TORRES, J.J., MARRO, J., Y MUÑOZ, M.A. 2010. Entropic origin of disassortativity in complex networks. *Physics Review Letters* 104: 108702.
- [47] OLESEN, J. M., BASCOMPTE, J., DUPONT, Y. L., Y JORDANO, P. 2007. The modularity of pollination networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 104: 19891-19896.
- [48] STEUER, R., Y ZAMORA-LÓPEZ, G. 2008. Global network properties. En: B. Junker, y F. Schreiber, eds., *Analysis of biological networks*. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ.

- [49] GUIMERÀ, R., Y AMARAL, L.N. 2005. Functional cartography of complex metabolic networks. *Nature* 433: 895-900.
- [50] SALES-PARDO, M., GUIMERÀ, R., MOREIRA, A.A., Y AMARAL, L.A.N. 2007. Extracting the hierarchical organization of complex systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 104: 15224-15229.
- [51] JUNKER, B.H., Y SCHREIBER, F. 2008. *Analysis of biological networks*. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ.
- [52] JORDANO, P. 2010. Coevolution in multispecific interactions among free-living species. *Evolution, Education, and Outreach* 3: 40-46.
- [53] SCHEFFERS, B.R., JOPPA, L.N., PIMM, S.L. Y LAURANCE, W.F. 2012. What we know and don't know about Earth's missing biodiversity. *Trends in Ecology and Evolution* 27: 501-510.
- [54] MAY, R.M. 1990. How many species? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 330: 293-304.
- [55] MAY, R.M. (2011). Why Worry about how many species and their loss? *PLoS Biology* 9: e1001130.
- [56] COSTELLO, M.J., MAY, R.M. Y STORK, N.E. 2013. Can we name Earth's species before they go extinct? *Science* 339: 413-416.
- [57] WILSON, E.O. 1992. *The diversity of life*. Harvard University Press. Cambridge, MA.
- [58] BREITBART, M. Y ROHWER, F. 2005. Here a virus, there a virus, everywhere the same virus? *Trends in Microbiology* 13: 278-284.
- [59] OLESEN, J.M., BASCOMPTE, J., DUPONT, Y.L., ELBERLING, H., RASMUSSEN, C. Y JORDANO, P. 2011. Missing and forbidden links in mutualistic networks. *Proceedings of the Royal Society B., Biological Sciences* 278: 725-732.
- [60] MARGALEF, R. Y GUTIÉRREZ, E. 1983. How to introduce connectance in the frame of an expression for diversity. *American Naturalist* 121: 601-607.
- [61] HURLBERT, S.H. 1971. The nonconcept of species diversity: a critique and alternative parameters. *Ecology* 52: 577-586.
- [62] SOLÉ, R.V. Y VALVERDE, S. 2004. Information theory of complex networks: on evolution and architectural constraints. In: *Complex networks, Lecture Notes in Physics* (eds. Ben-Naim, E., Frauenfelder, H. Y Toroczkai, Z.). Springer, New York, USA, págs. 189-207.
- [63] STROGATZ, S.H. 2001. Exploring complex networks. *Nature* 410: 268-76.
- [64] KAUFFMAN, S.A. 1993. *The origins of order. Self-organization and selection in evolution*. Oxford University Press. Oxford, UK.
- [65] ALBERT, R., JEONG, H., Y BARABÁSI, A.L. 2000. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature* 406: 378-382.
- [66] SOLÉ, R. Y BASCOMPTE, J. 2006. *Self-organization in complex ecosystems*. Princeton University Press. Princeton, NJ, USA.
- [67] ROHR, R.P., SAAVEDRA S. Y BASCOMPTE, J. 2014. On the structural stability of mutualistic systems. *Science* 345: 1253497.
- [68] SAAVEDRA, S., ROHR, R.P., GILARRANZ, L.J. Y BASCOMPTE, J. 2014. How structurally stable are global socioeconomic systems? *Journal of the Royal Society Interface* 11: 20140693.
- [69] MAY, R.M., LEVIN, S.A., Y SUGIHARA, G. 2009. Complex systems: ecology for bankers. *Nature* 451: 893-895.
- [70] LUCAS, RE. 1988. On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economy* 22: 3-42.
- [71] VALIENTE-BANUET, A., AIZEN, M.A., ALCÁNTARA, J.M., ARROYO, J., COCUCCI, A., GALETTI, M., GARCÍA, M.B., GARCÍA, D., GÓMEZ, J.M., JORDANO, P., MEDEL, R., NAVARRO, L., OBESO, J.R., OVIEDO, R., RAMÍREZ, N., REY, P.J., TRAVESET, A., VERDÚ, M., Y ZAMORA, R. 2014. Beyond species loss: the extinction of ecological interactions in a changing world. *Functional Ecology* 29: 299-307.

- [72] JANZEN, D.H. 1974. The deflowering of Central America. *Natural History* 83: 48-53.
- [73] EMER, C., GALETTI, M., PIZO, M.A., GUIMARÃES JR., P.R., MORAES, S., PIRATELLI, A., Y JORDANO, P. 2018. Seed-dispersal interactions in fragmented landscapes - a metanetwork approach. *Ecology Letters* 21: 484-493.
- [74] GALETTI, M., GUEVARA, R., CÔRTEZ, M.C., FADINI, R., VON MATTER, S., LEITE, A.B., LABECCA, F., RIBEIRO, T., CARVALHO, C.S., COLLEVATTI, R.G., PIRES, M.M., GUIMARÃES JR., P.R., BRANCALION, P.H., RIBEIRO, M.C. Y JORDANO, P. 2013. Functional extinction of birds drives rapid evolutionary changes in seed size. *Science*, 340: 1086-1091.
- [75] BELLO, C., GALETTI, M., PIZO, M.A., MAGNAGO, L.F.S., ROCHA, M.F., LIMA, R.A.F., PERES, C.A., OVASKAINEN, O. Y JORDANO, P. 2015. Defaunation affects carbon storage in tropical forests. *Science Advances* 1: e1501105.
- [76] MARGALEF, R. 1957. La teoría de la información en ecología. *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona* 32: 373-449.
- [77] MAGURRAN, A.E. 1988. *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA.
- [78] PERES, C.A., EMILIO, T., SCHIETTI, J., DESMOULIÈRE, S.J.M. Y LEVI, T. 2016. Dispersal limitation induces long-term biomass collapse in overhunted Amazonian forests. *Proceedings National Academy of Sciences, USA* 113: 892-897.
- [79] JORDANO, P. 2014. Fruits and frugivory. En: Gallagher, *Seeds: the ecology of regeneration in plant communities* (ed. Gallagher, R.S.). CABI, Wallingford, UK, págs. 18-61.
- [80] REDFORD, K.H. 1992. The empty forest. *Bioscience* 42: 412-422.
- [81] LEVIN, S.A. 1992. The problem of pattern and scale in ecology: The Robert H. MacArthur Award Lecture. *Ecology* 73: 1943-1967.





## **DISCURSO PRONUNCIADO POR EL EXCMO. SR. D. BENITO VALDÉS CASTRILLÓN**

*Académico Numerario,  
en contestación al leído por  
el Ilmo. Sr. D. Pedro Jordano Barbudo,  
en el acto de su recepción como académica numeraria,  
celebrado el día 3 de octubre de 2022*

Pedro Jordano Barbudo nació en Córdoba el 23 de julio de 1957, en el seno de una conocida y extensa familia cordobesa a la que han pertenecido y pertenecen prestigiosos veterinarios, abogados, médicos, biólogos e historiadores.

Su abuelo y patriarca de la familia, Diego Jordano Icardo (Córdoba, 1873-1926), nacido en Córdoba el 7 de junio de 1873, estudió en la Universidad de Sevilla, primero en la Facultad de Medicina y después en la de Ciencias. Fue catedrático de Historia Natural del Instituto de Enseñanza Media de Córdoba desde el 1 de enero de 1904<sup>1</sup> y subdirector del Instituto, en una época en la que los claustros de los Institutos de Enseñanza Media estaban formados por profesores de alto nivel científico y pedagógico<sup>2</sup>. Fue además concejal del Ayuntamiento de Córdoba en 1925 y académico numerario de la Real Academia de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes de Córdoba (Rodero & Rodero, 2011; Anónimo, 1926).

Su padre, Diego Jordano Barea (Córdoba, 1918-2002), fue catedrático de Biología, Botánica y Zoología Aplicada de la Facultad de Veterinaria de Córdoba, y al comienzo de la creación de la Universidad de Córdoba, impartió Zoología II en la Sección de Biología de la Facultad de Ciencias y Biología General en la de Medicina. En 1950 fue nombrado académico correspondiente y nueve años después numerario de la Real Academia de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes de Córdoba. Académico de honor de la Real Academia de Ciencias Veterinarias de Andalucía Oriental en 1975, en 1979 se incorporó como académico numerario a la Real Academia Sevillana de Ciencias Veterinarias (Rodero & Rodero, 2011).

---

1. Con anterioridad y durante dos años, había sido Catedrático de Agricultura y Técnica Agrícola del Instituto de Enseñanza Media de Jerez de la Frontera.

2. Sirva de ejemplo que uno de sus compañeros de claustro, el geólogo, paleontólogo y prehistoriador Eduardo Hernández-Pacheco, pasó a ocupar, en 1910, la Cátedra de Geología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid. Una calle en el barrio del Brillante de Córdoba a él dedicada, recuerda su paso por esta ciudad. Su hijo Francisco Hernández-Pacheco, fue Catedrático de Geografía Física en la Facultad de Biología de la Universidad de Madrid (Alía, 1976) y profesor de al menos tres miembros de esta Academia.

Uno de sus 11 tíos carnales, Juan Jordano Barea (Córdoba, 1924 - Sevilla, 2005) fue catedrático de Derecho civil de la Universidad de Sevilla y Medalla de Oro de la Real Academia Sevillana de Legislación y Jurisprudencia (Gordillo, 2005). Su hijo, Jesús Jordano Fraga, catedrático de Derecho Administrativo de la Universidad de Sevilla, está especializado en Derecho Ambiental.

Su primo Rafael Jordano Salinas, hijo de su tío Francisco, prestigioso veterinario cordobés, es catedrático de Nutrición y Bromatología de la Universidad de Córdoba, académico numerario de la Real Academia Sevillana de Ciencias Veterinarias desde 2013 y de la Academia Andaluza de Ciencia Regional desde 2019. Es además académico numerario electo de la Real Academia de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes de Córdoba.

La familia Jordano emparentó con la familia Mir, de origen malagueño, cuando Dolores Jordano Barea se casó con Rafael Mir de las Heras, el primer Mir nacido en Córdoba<sup>3</sup>. Se inicia así la línea familiar Mir-Jordano, de la que hay que mencionar, entre otros, a Rafael Mir Jordano y a Diego Mir Jordano, primos del recipiendario.

Rafael Mir Jordano (Córdoba, 11 de septiembre de 1930), abogado y profesor de derecho de la Universidad de Córdoba, es desde 2002 académico numerario de la Real Academia de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes de Córdoba, en cuyos actos participa regularmente a pesar de contar ya con 92 años de edad.

Diego Mir Jordano (Córdoba), hermano del anterior, es catedrático emérito de Fisiología Médica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Sevilla. Dirigió la tesis doctoral de José López Barneo, académico numerario de las Reales Academias Sevillana de Ciencias y de Medicina y Cirugía de Sevilla, y académico correspondiente de la Real Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Esta es una breve muestra del ambiente cultural, docente y académico que rodea a Pedro Jordano, que se incorpora hoy a nuestra Academia y que pronto lo hará, también como numerario, a la Real Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Con el recuerdo de un abuelo profesor de Ciencias Naturales, y con un padre con amplísimos conocimientos en los distintos campos de la Biología, a quien no dudamos en considerar como un auténtico erudito, no es de extrañar que nuestro recipiendario se inclinase desde edad muy temprana por esta rama del saber, por la que se ha ido apasionando cada vez más a lo largo de su carrera investigadora.

Ya desde niño sentía una gran atracción por la Naturaleza. Recorría los campos cordobeses, en los que nada escapaba a su marcada capacidad de observación, y coleccionaba con su hermano, actualmente catedrático de Ecología de la Universidad de Córdoba, toda clase de animales, desde insectos a reptiles y aves.

En 1974 inicia sus estudios universitarios en la Sección de Biología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Córdoba. Con su padre podía dialogar y opinar sobre materias muy diversas relacionadas con la carrera, y no hay duda que de él recibió nu-

---

3. Prestigioso abogado, fue premio extraordinario del Grado de Bachiller en 1918, cuando cursó el Bachillerato en el Instituto del que era Catedrático el abuelo del recipiendario (Vázquez Aroca, 1918).

merasas enseñanzas, entre las que se encuentra el manejo del programa estadístico SAS IML, lo que agradece Pedro a su padre en una de sus publicaciones (Jordano, 1995a).

Pedro no se limitó a estudiar las asignaturas que componían la carrera de Biología, en la que obtuvo magníficas calificaciones, sino que, empujado por su vocación por los animales, se puso en contacto con el Departamento de Zoología. Fruto de ello fue su participación en varias publicaciones producidas en el Departamento, como un estudio sobre protección de murciélagos en España, publicado en 1977 en la revista de divulgación *Periplo*, o el dedicado al eslizón ibérico (*Chalcides bedriagai*) (López-Jurado & al., 1978), aparecido en 1978 en la revista *Doñana Acta Vertebrata*, siendo todavía estudiante, o los realizados en este periodo, pero publicados en 1980 y 1981, sobre rapaces (Jordano, 1981a; Jordano & Torres Esquivias, 1981; Torres Esquivias & al., 1980, 1981) y reptiles (Jordano & al., 1980), o el censo de buitreras de la provincia de Córdoba (Villasante & al., 1981).

En el verano de 1978, esto es, terminado el cuarto curso de carrera, comienza sus estudios de campo encaminados a la realización de una tesina de licenciatura. Se desarrollaron en la finca El Bañuelo, de la Sierra Morena de Córdoba, entre julio y noviembre, bajo la dirección de Carlos Herrera Maliani, profesor de investigación de la Estación Biológica de Doñana, con quien le había puesto en contacto su profesor de Zoología José Antonio Hernando Casal<sup>4</sup>. Contó además con la ayuda incondicional de Myriam, por entonces su novia, con quien se casaría en 1980, y con la de Ramón Casimiro-Soriguer, también profesor de investigación de la Estación Biológica de Doñana<sup>5</sup>.

En 1979 obtiene el título de licenciado en Ciencias Biológicas con Premio Extraordinario, tras la presentación de la tesina titulada “Estrategias reproductivas de las zarzas (*Rubus ulmifolius*, Rosaceae): coevolución con los pájaros dispersantes de las semillas”, que resultó en la publicación de dos artículos científicos: uno en la revista *Doñana Acta Vertebrata* (Jordano, 1981b<sup>6</sup>) y otro en la revista *Oikos* (Jordano, 1982), que es el órgano de difusión de la Nordic Ecological Society, y que constituye el primer trabajo científico publicado por Jordano como único autor en una revista extranjera, lo que debió estimular considerablemente al beneficiario, aunque había publicado un año antes, junto con su maestro Carlos Herrera, dos artículos científicos en sendas revistas extranjeras (Herrera & Jordano, 1981; Jordano & Herrera, 1981), resultantes de estudios de campo realizados en la sierra de Cazorla en julio de 1979. Pero también es resultado de su tesina de licenciatura otro artículo publicado por Jordano en la revista *Oikos* en 1984 (Jordano, 1984).

---

4. Conocido familiarmente como “Pepe peces”, falleció el pasado 1 de enero de 2021, siendo Profesor Titular, ya jubilado, de la Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales de la Universidad de Cádiz.

5. A los tres agradece su ayuda Pedro Jordano en dos de las publicaciones a las que daría lugar la Tesina (Jordano 1981b, 1982).

6. El volumen 8 de esta revista, en la que se publicó este artículo, está fechado en 1981, pero se publicó en 1982, como figura en la propia revista, con posterioridad a la publicación en 1982 del volumen 38 de la revista *Oikos* en el que apareció el segundo artículo (Jordano, 1982), al que cita Jordano en el de *Doñana Acta Vertebrata*.

En 1980, se traslada a Sevilla para incorporarse a la Estación Biológica de Doñana, donde gracias a la concesión de una beca de investigación de la Fundación Juan March comienza bajo la dirección de Herrera la preparación de una tesis doctoral, cuyo trabajo de campo se desarrolló en Hato Ratón (Villamanrique de la Condesa), dentro del espacio natural de Doñana. El 11 de octubre de 1984 presentaba su tesis doctoral en la Universidad de Sevilla con el título “Relaciones entre plantas y aves frugívoras en el matorral mediterráneo del área de Doñana”, de la que fue ponente nuestro académico Francisco García Novo. De ella publicó un resumen la Universidad de Sevilla en 1986 (Jordano, 1986) y puede accederse a su contenido completo a través del Depósito de Investigación de la Universidad de Sevilla, en formato PDF (284 pp. + 9 apéndices). Dio como resultado la elaboración y publicación de 10 artículos científicos sobre dispersión de semillas por aves (Jordano, 1987a-d, 1988a, 1989a, 1989b) y sobre mecanismos de polinización (Jordano, 1988b). Había publicado además dos trabajos relacionados con la tesis durante el periodo de realización de la misma (Jordano, 1983a, 1983b).

En 1987, tras la preceptiva oposición, Pedro Jordano es nombrado científico titular<sup>7</sup> del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, con destino en la Estación Biológica de Doñana.

Ya en la década de 1990, Jordano publica varios artículos científicos más sobre biología de la reproducción de varias especies vegetales del área de Doñana o de la sierra de Cazorla (Jordano, 1990a, 1990b, 1991, 1993a) o sobre interacciones mutualistas (Jordano 1993b, 1994).

Se van afianzando así sus investigaciones sobre diversos aspectos de frugivoría y sus efectos en dispersión de semillas y se va haciendo un nombre como destacado investigador a nivel nacional e internacional en la que es su principal línea de investigación: los mecanismos de dispersión e interacciones mutualistas, de lo que es una buena muestra una revisión del tema que con el título de “Fruits and frugivory” publicada en 1992 en el libro editado por Fenner: “Seeds. The ecology and regeneration in natural plant communities” (Jordano, 1992) con dos ediciones posteriores (Jordano, 2000, 2014), así como diversos trabajos científicos sobre el tema publicados en esa década, sea como autor único (Jordano, 1995a, 1995b) o junto con su maestro, Carlos Herrera y otros autores (Jordano & Herrera, 1995; Herrera & al., 1994, 1998).

Pero retrocedamos unos años.

Siendo todavía estudiante, asiste a una conferencia sobre biología reproductiva en los bosques de Brasil, impartida en la Universidad de Córdoba por Peter Gibbs, profesor de Botánica de Saint Andrews (Escocia), visitante en la Universidad de Sevilla. Atraído por su contenido y deseando conocer los bosques tropicales, en 1980 Pedro Jordano permanece durante casi tres meses (de enero a marzo) en Costa Rica, participando en un curso intensivo de campo de Ecología de Poblaciones a nivel de postgrado, de la Organización de Estudios Tropicales, uno de los más prestigiosos de América Latina, que se desarrolla en dos líneas, una para estudiantes de Estados Unidos y otra para estudiantes latinoamericanos. Allí coincide con Jens M. Olesen, profesor de Ecología de la

---

7. Esto es, el antiguo Investigador Científico.

universidad danesa de Aarhus, experto en mecanismos de reproducción y polinización, que se encontraba en Costa Rica siguiendo ese curso con un grupo de sus alumnos. Ya doctor, vuelve a coincidir en 1985 en Costa Rica con Olesen, cinco años mayor que él, siguiendo durante dos meses el curso de Ecología de Poblaciones. Se establece así entre ambos un estrecho vínculo de amistad y colaboración que resulta en la preparación y publicación a partir de 1990 de trabajos conjuntos sobre redes mutualistas de interacción planta-animal. A partir de 1985 Pedro Jordano visitaría Costa Rica varias veces más, pero participando ya en el curso de campo, como profesor, junto a Gary Stiles, coordinador de la Organización de Estudios Tropicales.

Otro estrecho colaborador de Pedro Jordano es el catalán Jordi Bascompte, en este caso 10 años más joven que nuestro beneficiario. Doctor en Biología por la Universidad de Barcelona en 1994, Jordi Bascompte se trasladó a la Universidad de California como investigador de postgrado, primero en Irvine (1996-1997) y posteriormente en Santa Bárbara (1997-1999). A través de Jordano, se incorporó a la Estación Biológica de Doñana en 1999, esto es, a su vuelta de Estados Unidos, permaneciendo en la Estación Biológica hasta 2015, en que pasa a ocupar la Cátedra de Ecología de la Universidad de Zurich. Jordano, Olesen y Bascompte colaboran estrechamente en diversos aspectos relacionados con redes complejas de interacción entre plantas y animales, que han resultado en la preparación y publicación desde el año 2000 hasta la actualidad de numerosos trabajos de investigación sobre el tema que han sido publicados en las más prestigiosas revistas especializadas y en los que han intervenido otros investigadores. Los tres son autores del artículo “Asymmetric coevolution networks facilitate biodiversity maintenance”, publicado en 2006 en la prestigiosa revista *Science* (Bascompte & al., 2006), que recibió en 2008 el Mercer Award de la Ecological Society of America, al ser considerado el mejor artículo publicado en esta especialidad por autores de menos de 40 años. Jordano y Olesen ya no lo eran, pero Bascompte sí. Y Jordi Bascompte y Pedro Jordano publicaron en 2013 el libro “Mutualistic Networks”, dentro de la serie “Monographs in Population Biology” de la estadounidense Princeton University Press, que recibió en 2016 el March Award que concede anualmente la British Ecological Society al mejor libro publicado en Ecología.

Es una parte de la producción científica de Pedro Jordano, en lo que hay que considerar su primera línea de investigación: los mecanismos de dispersión y el análisis de redes mutualistas complejas entre plantas y animales, y sus consecuencias dentro de los ecosistemas.

En la década de los 90 Pedro Jordano conoce al ecólogo brasileño Mauro Galetti con ocasión de la visita a nuestra ciudad realizada por Galetti durante su permanencia en la Universidad de Cambridge entre 1992 y 1996, realizando su tesis doctoral. Jordano lo acompañó a lo largo de dos semanas, haciendo en cierto modo de cicerone, con lo que establecieron estrechos lazos de amistad. Pocos años después, en 2000, Pedro acude a Brasil para participar en el Tercer Congreso Internacional de Frugivoria y Dispersión de Semillas celebrado en Sao Paulo, en el que presentó una comunicación con José Antonio Godoy, al que me referiré más adelante, y otra con su discípulo Juan Luis García Castaño, cuya muerte prematura hemos tenido que lamentar este año. Pedro Jordano se

reencuentra con Mauro Galetti, que había sido nombrado en 1998 profesor de la Universidad Estatal de Sao Paulo, y permanece una temporada en Campinas, de donde es natural Mauro. A partir de entonces, Pedro Jordano visita Brasil todos los años, participando como profesor en el Curso Latinoamericano de Frugivoria y Dispersión de Semillas<sup>8</sup>, que congrega a estudiantes de distintas universidades de los países americanos. Cuando hace diez años da comienzo el programa de Ciencias sin Frontera de la Universidad Estatal Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Pedro Jordano es nombrado profesor externo.

Así que desde 2001, Pedro Jordano mantiene una estrecha relación de colaboración docente e investigadora con Mauro Galetti y su equipo de ecólogos brasileños. Desarrolla así lo que se puede considerar una segunda línea de investigación de nuestro nuevo académico: ecología tropical, que ha dado como resultado la publicación de más de 20 artículos sobre frugivoria y sobre redes mutualistas complejas entre plantas y animales en los bosques tropicales, que si bien siguen la pauta de las investigaciones sobre relaciones mutualistas en los ecosistemas mediterráneos, que constituyen su línea principal de investigación, las de los trópicos son mucho más complejas. Baste recordar, por ejemplo, que mientras que nuestros bosques mediterráneos vienen definidos por la presencia, a veces exclusiva, de una determinada especie arbórea, y así les llamamos encinares, alcornocales, pinares, pinsapares, hayedos, etc., aunque suelen ser ricos en especies arbustivas, en los bosques tropicales pueden convivir hasta 200 especies arbóreas en una sola hectárea, como ocurre en algunas selvas del SE asiático. Por otro lado, en los ecosistemas mediterráneos la dispersión de las semillas se debe fundamentalmente a aves y mamíferos; pero en los ecosistemas tropicales intervienen también los reptiles y los peces.

A finales de los 80, Manuel Nogales Hidalgo, que había obtenido su licenciatura en la Universidad de La Laguna en 1985, contacta con la Estación Biológica de Doñana y solicita de Pedro Jordano la dirección de su tesis doctoral. Acepta Jordano y es, de hecho, la primera tesis doctoral que dirige, en este caso sobre dispersión de semillas de plantas superiores del archipiélago canario. Hasta ahora, el nuevo académico había sido alumno y discípulo y, en su discurso, refiriéndose a sus excelentes maestros, utiliza en dos ocasiones la frase que se atribuye a Isaac Newton: “Si he logrado ver más lejos ha sido porque he subido a hombros de gigantes”. Pero al ocuparse de dirigir una tesis doctoral, se convierte él mismo en maestro de su primer discípulo. Sin duda, puso toda su ilusión y empeño en esta tarea de transmisión de conocimientos. Con ella obtuvo Nogales en 1990 el título de doctor por la Universidad de La Laguna, a la que se incorporó poco después como profesor titular (1995-2004). En la actualidad, el Dr. Nogales es investigador científico del Consejo Superior de Investigaciones Científicas con destino en el Instituto de Productos Naturales y Agrobiología de La Laguna.

Con Nogales codirige Jordano la tesis doctoral de Alfredo Valido Amador, igualmente licenciado en la Universidad de La Laguna, en 1989, en la que obtuvo el título de doctor en 1999. Pero no se estableció en las Islas Canarias como Nogales, sino que,

---

8. Son cursos que se desarrollan a lo largo de dos semanas de trabajos de campo, precedidos de varias clases teóricas.

tras obtener una beca de postgrado Marie Curie de la Unión Europea (2001-2003) para completar su formación en la Universidad de Aarhus con el Dr. Olesen, y un contrato post-doctoral Ramón y Cajal en la Universidad San Carlos de Madrid, fue desde 2004 hasta hace dos años investigador de la Estación Biológica de Doñana<sup>9</sup>. Se repitió la historia, pues Valido codirigió con Pedro Jordano la tesis doctoral de la bióloga canaria Candelaria Rodríguez Rodríguez, defendida en La Laguna en 2016. Todavía dirigió Jordano una cuarta tesis a un biólogo canario, Néstor Pérez, en este caso sobre dispersión de semillas por el lagarto canario, defendida también en 2016, pero en la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla. Desde 2019, Néstor Pérez desarrolla su actividad investigadora en el Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Barcelona.

Es así como Pedro Jordano se interesa en ecología y evolución de islas, tan distintas a las de las áreas continentales. Pues a diferencia de lo que ocurre en la Península, donde la polinización por aves y reptiles es prácticamente anecdótica, en las Islas Canarias al menos cinco especies de aves liban habitualmente y polinizan eficazmente al menos a 11 especies macaronésicas con síndrome floral típicamente ornitófilo, y el lagarto canario poliniza las flores de al menos tres especies de plantas vasculares y dispersa las semillas de al menos otras tres. Se implica así Jordano en la que se puede considerar una tercera línea de investigación, en la que ha publicado hasta la fecha, sobre todo con Manuel Nogales y Alfredo Valido, algo más de 15 artículos de investigación sobre mecanismos de polinización y de dispersión de semilla por aves y reptiles en las Islas Canarias.

En 1997, por iniciativa de Fernando Hiraldo, que era entonces su director, se crea en la Estación Biológica de Doñana el Laboratorio de Biología Molecular, con objeto de asegurar y facilitar el desarrollo de proyectos de investigación que pudieran incluir técnicas genéticas. Pedro Jordano fue desde 1997 a 2002 el coordinador científico de este laboratorio, al que se incorporó en 1997 como técnico especialista José Antonio Godoy López<sup>10</sup>. Con las facilidades proporcionadas por el Laboratorio de Biología Molecular, Pedro Jordano se implica en el estudio del flujo génico en plantas por dispersión de polen y semillas, publicando entre 2001 y 2021, junto con Antonio Godoy en los primeros años y con otros investigadores después, un total de 25 artículos científicos en lo que ha de considerarse una cuarta línea de investigación: consecuencias genéticas de los procesos de dispersión de polen y semillas.

Desde 1991, Pedro Jordano es profesor de investigación de la Estación Biológica de Doñana, en la que dirige el Grupo de Investigación de Ecología Integrativa. Ha sido Director del Departamento de Biología Evolutiva de la Estación desde 1996 hasta 1998 y desde 2002 hasta 2004, y, como ya se ha indicado, coordinador científico del Laboratorio de Ecología Molecular desde 1997 hasta 2002.

---

9. El Dr. Valido es en la actualidad profesor de Investigación del Instituto de Productos Naturales y Agrobiología de La Laguna.

10. Licenciado en Biología en 1986, en 1987 obtuvo una beca pre-doctoral para formarse en el área de Biología Molecular en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS, C.S.I.C.). Tras doctorarse en 1991, y permanecer tres años en la Universidad de California en Berkeley (1991-1993), se incorporó a la Estación Biológica de Doñana, de la que es investigador científico desde 1999.

Ha intervenido en 48 proyectos de investigación, de los que ha sido Investigador Principal en 31 de ellos, e investigador participante en los demás. De ellos 27 han sido financiados por el Estado Español, 10 por la Junta de Andalucía, seis por la Comisión Europea, cuatro por el Gobierno de Brasil y uno por el de Estados Unidos.

Ha dirigido o codirigido 15 tesis doctorales, presentadas en las Universidades de Sevilla, La Laguna, Sao Paulo, Campinas, Madrid y Barcelona, y se encuentra actualmente dirigiendo tres más.

Ha dirigido además numerosas trabajos de fin de grado y de máster, presentados sobre todo en las Universidades de Sevilla y Estatal de Sao Paulo.

Ha presentado ponencias y comunicaciones en numerosos congresos nacionales e internacionales de su especialidad, y organizado o coorganizado siete de ellos, en Sao Paulo (2000), Copenhague (2000), Campinas (2004), Brisbane (Australia, 2005), Sevilla (2009), Montpellier (2010) y Madrid (2019).

El resultado de su larga trayectoria investigadora ha sido la publicación de cerca de 300 artículos científicos aparecidos en revistas especializadas, varios capítulos de libros, y cuatro libros de su especialidad, que en su conjunto han recibido 33.269 citas (datos de Google Académico referidos a junio de este año 2022), de las que casi la mitad, 15.002, corresponden a los artículos científicos publicados entre 2017 y 2021.

Es miembro de los comités editoriales de varias revistas científicas, entre las que se encuentran el *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* y el *Journal of Evolutionary Biology*, y de varias sociedades científicas españolas y extranjeras.

Con un índice h de 87 y un índice i10 de 186 (datos de Google Scholar y Lab Web-page) es uno de los investigadores más citados en Ecología y Ciencias Ambientales. Figura en la lista de los científicos más influyentes entre 2015 y 2021.

Cuando en 2020 los ministerios de Ciencia y de Transición Ecológica nombraron un grupo de trabajo interdisciplinar para asesorar al Gobierno sobre el desarrollo en nuestro país de la pandemia provocada por el coronavirus SARS-CoV-2, Pedro Jordano fue uno de los 15 miembros de dicho grupo, que ha mantenido su actividad durante casi dos años.

Sus trabajos de investigación le han valido la concesión de los dos premios ya mencionados: el Mercer Award que concedió en 2008 la Ecological Society of America a un artículo publicado en Science en 2006, y el March Award, que concedió en 2016 la British Ecological Society al libro publicado en 2013.

Pero hay que destacar, sobre todo, que en 2014 recibió el prestigioso Premio Jaime I en el área de Ciencias Ambientales y Conservación, y en 2018 el Premio Nacional de Investigación Científica en el área de Ciencias y Tecnologías de los Recursos Naturales.

Y he de resaltar un premio popular muy relevante, por lo que supone de reconocimiento fuera de los ambientes académicos. Cuando Pedro Jordano se trasladó a Sevilla, en 1980, eligió para vivir el barrio de Triana. En 2019 recibió el reconocimiento y admiración de sus vecinos al ser nombrado “hijo adoptivo de Triana”, distinción que le fue entregada durante la popular Velá de Santa Ana. Así que nuestro nuevo académico es cordobés, pero también trianero.



Quiero resaltar aquí otra faceta que hay que añadir a la personalidad del Dr. Pedro Jordano, que es la docente.

Pedía Jordano en una ocasión dirigiéndose a los científicos, que desarrollasen su trabajo “dando lo mejor de sí mismos, ayudando a los demás ... [y] que cultiv[as]en el trabajo en equipo y la colaboración”, que son principios que se ha aplicado así mismo, y en otra ocasión decía, y cito textualmente: “He aprendido el valor de compartir el conocimiento”

Entiende que de poco vale lo que sabes si no lo transmites. Y hay dos maneras de hacerlo: a través de la publicación de los resultados de las investigaciones, generalmente dirigidos a los especialistas, y transfiriendo los conocimientos directamente, dirigiendo trabajos de Tesis o de Maestría, como ha hecho, interviniendo en cursos especializados, o impartiendo conferencias en las que se divulga el conocimiento. Esto es, siendo profesor a distintos niveles, para lo que “hay que entender muy bien lo que enseñas” como también ha dicho Pedro Jordano.

Desde 2001 interviene anualmente como profesor de la Universidad Estatal de Sao Paulo en los cursos de postgrado de Ecología y Biodiversidad, de Frugivoria y Dispersión de Semillas o de Ecología de los Mutualismos animal-planta, que tienen lugar en Campinas o en Rio Claro, no lejos de Sao Paulo, y que se estructuran, como se ha indicado anteriormente, con unas clases teóricas seguidas de dos semanas de prácticas de campo. Y desde 2013, cuando Brasil inicia el Programa de Ciencias sin Frontera de la UNESP (Universidade Estadual Paulista), se incorpora Pedro Jordano como Profesor Externo, por haber dirigido ya tres Tesis Doctorales y varias Tesis de Maestría en dicha Universidad.

En 2008, el director de la Estación Biológica de Doñana, Fernando Hiraldo, y el rector de la Universidad Pablo Olavide de Sevilla, Juan Jiménez Martínez, firmaron un convenio de colaboración para impartir un máster en Biodiversidad y Biología de la Conservación, que organizaron entre Modesto Luceño y Pedro Jordano, quien lo dirigió durante ocho años (desde el 15 de octubre de 2009 hasta el 20 de mayo de 2016).

Poco después, la Agencia Estatal del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (siendo su presidente Rafael Rodríguez Montero) y la Universidad de Sevilla (siendo su rector Joaquín Luque Rodríguez) firmaron un acuerdo marco, con el objetivo de “colaborar para llevar a cabo actividades relacionadas con la investigación, el desarrollo tecnológico, la formación y la divulgación científica”. En virtud de dicho acuerdo, el Dr. Jordano pasó a intervenir en la docencia de postgrado del Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla, desde 2010, como profesor honorario, y en 2020, a propuesta del rector actual, Miguel Ángel Castro Arroyo, como profesor asociado de la Universidad de Sevilla. Pero ya desde 2004, y durante casi 12 años, el Dr. Jordano estaba participando en la organización de un curso de doctorado sobre “Biogeografía y Evolución”, impartido por Pedro Jordano y por Juan Arroyo, catedrático de Botánica de dicho departamento, y había participado, junto con Juan Arroyo y Teodoro Marañón (profesor de Investigación del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla) en una serie de ciclos de seminarios sobre Ecología y Evolución de las Plantas, en el que impartieron conferencias más de 70 especialistas de talla internacional.

A esta participación continuada en el tiempo en las tres universidades citadas, hay que añadir que Pedro Jordano ha intervenido en cursos de máster, de doctorado o en otros cursos de postgrado en las universidades de México DF (1985), Córdoba (1992, 1993 y 2006), Umea (Suecia, 1992), Uppsala (Suecia, 1995), Estocolmo (1997 y 2006), Xalapa (México, 1998), San Juan de Puerto Rico (1998), Valencia (2008) e Islas Baleares (2009-2011).

Ha impartido además conferencias en distintas ciudades de España, Costa Rica, Suecia, Brasil, Puerto Rico, Suiza, Dinamarca, Francia, Inglaterra, México y Estados Unidos.

A pesar de esta intensa actividad investigadora y docente, aún ha tenido tiempo Jordano, quitándose a su familia, como siempre, para comprometerse con la gestión de la investigación de nuestro país y de la Unión Europea, formando parte de comisiones de asignación de becas y proyectos de investigación, cuando ha sido requerido para ello.

Entre 2003 y 2008 fue miembro de la Comisión de Investigación del Programa de Biodiversidad, Ciencias de la Tierra y Cambio Global, de la Dirección General de Proyectos de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia. Y entre 2004 y 2008 representó a este Ministerio en el programa Eurocores (European Collaborative Research) EuroDiversity de la European Science Foundation.

Entre 2009 y 2011 fue vicepresidente del Comité para Becas de Iniciación a la Investigación (Starting Grants) del European Research Council (Bruselas), Comité que pasó a presidir entre 2012 y 2016.

Paralelamente, entre 2008 y 2013, pasó a presidir la Comisión de Investigación del Programa Nacional de Biodiversidad, Ciencias de la Tierra y Cambio Global del Ministerio de Ciencia e Innovación, y desde 2018 preside el Área de Ciencias Ambientales y Tecnologías del Plan Nacional de Investigación.

Además, desde 2018 es secretario del jurado de los Premios Fronteras del Conocimiento de la Fundación BBVA (Banco Bilbao-Vizcaya).

Cuando en 2020 los ministerios de Ciencia y de Transición Ecológica nombraron un grupo de trabajo interdisciplinar para asesorar al Gobierno sobre el desarrollo en nuestro país de la pandemia provocada por el coronavirus SARS-CoV-2, Pedro Jordano fue uno de los 15 miembros de dicho grupo, que ha mantenido sus funciones durante casi dos años.

El discurso que ha leído el nuevo académico está formado por dos partes bien diferenciadas. En la primera, muestra su preocupación por la situación de la investigación en España. En la segunda, que constituye el núcleo central de discurso, se ocupa de las interacciones mutualistas, campo en el que es un experto a nivel internacional.

Como investigador, el Dr. Jordano sufre los problemas que tan acertadamente expone en su discurso, de los que destaca la insuficiente financiación, la excesiva burocratización, que hace perder a los investigadores una buena parte de su tiempo, la absurda petición de informar en los formularios de solicitud de proyectos sobre cuáles van a ser los resultados que se van a obtener, que aplicación van a tener, la conversión de los fondos concedidos en materia impresa, lo que obliga a los investigadores a publicar artículos superfluos, que a veces enmascaran los resultados verdaderamente trascenden-

tes, y en el caso de los investigadores noveles, la dificultad, por no decir imposibilidad, de conformar grupos de investigación propios con los que incorporarse al complejo y burocratizado sistema español de investigación.

En lo que se refiere a la financiación, las partidas destinadas a investigación y desarrollo en nuestro país en los presupuestos generales del Estado son muy insuficientes. Ciertamente estas partidas han aumentado desde principios de este siglo, en que la inversión en investigación supuso sólo un 0'88 % del producto interior bruto (PIB), cuando supone un 1'25 % en el momento actual, porcentaje que el Consejo Económico y Social de España considera insuficiente. Su incremento llevó desde el año 2000 un ritmo apreciable, que prometía expectativas muy favorables, hasta alcanzar un 1'36 % en 2010. Pero desde ese año fue disminuyendo hasta un 1'19 % en 2016. Y aunque ha ido aumentando de nuevo, poco podemos esperar dado el considerable incremento de la inflación, que ha alcanzado el 10'2 % en junio de este año, y que no parece que vaya a mejorar en un futuro próximo, y la tremenda deuda pública que ha alcanzado el 116'8 % del producto interior bruto en el segundo trimestre de este año (1'5 billones de euros), con lo que España se coloca entre los países con mayor deuda pública del mundo<sup>11</sup>.

Sólo cuando nuestros gobernantes entiendan que deben incrementarse considerablemente las partidas destinadas a investigación y desarrollo en los presupuestos generales del Estado, podrá revertirse la situación actual de desamparo en la que se encuentran nuestros investigadores, que compensan la falta de apoyo y facilidades con su vocación, a toda prueba. Es el “optimismo condicional”, como lo denomina el Dr. Jordano, que pese a las dificultades les hace seguir siempre adelante “a base de vocación, tesón, afición, oficio e imaginación”, repitiendo sus palabras.

Las primeras relaciones entre las plantas y los animales no pudieron ser más que de herbivoría, una forma de depredación en la que el organismo presa es una planta.

Pues las plantas son los únicos organismos capaces de transformar la energía lumínica, que tan generosamente envía el Sol a la Tierra, en energía química fosfatoligada. Las plantas, autótrofas, permitieron la aparición posterior de organismos heterótrofos, que necesitan para desarrollarse materia orgánica previamente sintetizada. Son los animales, fagótrofos, que se nutren por ingestión de vegetales o de otros animales, y los hongos, saprófitos o parásitos, que se nutren por absorción de compuestos orgánicos producidos por digestión externa.

Pero cuando las plantas abandonaron el medio acuático en el que se originaron y conquistaron el medio terrestre, aprendieron a utilizar a los animales para completar sus dos procesos biológicos más importantes: la reproducción y la colonización de nuevos territorios para ampliar sus áreas de distribución.

Durante millones de años, mientras vivieron protegidas por el agua de las radiaciones solares de onda corta, las plantas utilizaron el agua para ambos procesos, y así las siguen utilizando las algas y las plantas terrestres más primitivas: briofitas y pteridofitas. Pero estos dos grupos de plantas comenzaron a utilizar para dispersar sus esporas un segundo agente abiótico abundante en el medio terrestre: el aire. Y será más tarde el aire

---

11. Información del Banco de España, de 14 de junio de 2022.

el agente de dispersión de las esporas masculinas o granos de polen de la Gimnospermas, grupo que utiliza para dispersar sus semillas o bien a la simple barocoria, esto es, a su caída de la planta al suelo, o a la anemocoria, esto es, su transporte por el viento.

En el Mesozoico, a finales del Triásico o principios del Jurásico, esto es, hace unos 200 millones de años, un grupo de gimnospermas evolucionaron para dar origen a las angiospermas o plantas con flores, para constituir el grupo vegetal más diversificado y exitoso de las plantas, que con unas 250.000 especies son los componentes fundamentales de la mayoría de las formaciones vegetales que cubren la corteza terrestre. Aunque algunos grupos de angiospermas acuáticas utilizan el agua para la dispersión del polen y muchos son anemógamos, la gran mayoría de las angiospermas utilizan los animales, sobre todo los insectos, para la dispersión del polen.

Las angiospermas tuvieron una auténtica explosión evolutiva en el Cretáceo (Li & al., 2019), coincidiendo en buena parte con la máxima diversificación de los insectos con metamorfosis completa, como indica un estudio filogenético realizado por Misof y 100 autores más (Misof & al., 2014), basado en 1478 genes nucleares pertenecientes a 144 taxones representativos de todos los órdenes de insectos y otros artrópodos.

Dicha marcada diversificación tanto de insectos como de angiospermas hay que atribuirle, probablemente, a la coevolución provocada por los mecanismos de polinización y la especialización de los mismos.

En cuanto a los agentes de polinización, y teniendo en cuenta solamente los grupos de insectos más importantes, los coleópteros serían los primeros en el tiempo, seguidos de los himenópteros, lepidópteros y dípteros, en este orden (Grimaldi, 1999; Li & al., 2019). Más tarde intervendrían además, como agentes de polinización, varios grupos de aves, mamíferos, fundamentalmente murciélagos, y reptiles, sobre todo en las islas oceánicas.

De manera que a lo largo de la evolución de las angiospermas se han producido procesos de coevolución con los animales, produciéndose en las primeras una enorme diversidad de estructuras florales, colores y olores, que hace reconocer, por sus síndromes, el tipo principal de agente de polinización del que van a depender para facilitar o garantizar su reproducción. Secundariamente, recurrirán las angiospermas para su polinización también al aire y al agua.

Las angiospermas utilizan además a los animales para uno de sus mecanismos de dispersión de semillas: la dispersión endozoica, proceso en el que intervienen sobre todo las aves (ornitocoria), algunos grupos de mamíferos, los reptiles (saurocoria), sobre todo en las islas oceánicas, y los peces de agua dulce (ictiocoria), tanto en las regiones tropicales (véase, por ejemplo, Gottsberger, 1978 y Anderson & al., 2011) como en las templadas (véase, por ejemplo, Boedeltje & al., 2019 y Mulder & al. 2021), proceso de dispersión que según Gottsberger (1978) sería un tipo arcaico de zoocoria.

Se van estableciendo así redes de conexión y dependencia cada vez más complejas entre las plantas y los animales.

En el discurso con el que el nuevo académico ha dado cumplimiento al requisito imprescindible de incorporación a la Academia, el Dr. Jordano se ocupa de las redes complejas de interacciones mutualistas entre plantas y animales, que se establecen durante

los procesos de polinización y de los de dispersión de las semillas por endozoocoria. Como el Dr. Jordano indica, el estudio de las redes mutualistas se inicia a finales de los años 70 con la publicación por Joel Cohen en 1978 del libro “Food webs and niche space” (Cohen, 1978). A su estudio ha contribuido notablemente nuestro nuevo académico en sus aspectos metodológicos, que expuso en un interesante trabajo pionero publicado en 1987 en la revista científica *American Naturalist* (Jordano, 1987), así como en el publicado posteriormente junto con sus colaboradores Diego Vázquez y Jordi Bascompte en 2009 (Jordano & al., 2009) y más recientemente en la monografía “Mutualistic networks” anteriormente citada (Bascompte & Jordano, 2013). Y al estudio de las redes mutualistas complejas ha dedicado sus investigaciones el Dr. Jordano durante varias décadas, como ya se ha indicado.

Poco se puede añadir a lo que sobre redes mutualistas complejas ha expuesto el Dr. Jordano en el brillante discurso que acabamos de escuchar, para el que ha utilizado información e ilustraciones de sus propias publicaciones

Como el Dr. Jordano nos ha indicado, la Ecología es la ciencia de las interacciones y se inicia con el análisis de las redes tróficas, pues ninguna especie de nuestro planeta vive independientemente y sin interactuar con otras especies, particularmente con las que convive en el espacio y en el tiempo.

A medida que aumenta el número de especies en un área determinada, aumenta el número de interacciones entre ellas, de manera que se forman sistemas complejos para cuyo estudio se necesitan métodos y técnicas capaces de detectar que aspectos de la biodiversidad que la componen son críticos para su mantenimiento.

Una red trófica se compone de una serie de elementos, esto es, especies o nodos, unidos por enlaces que representan cualquier tipo de conexión entre ellos, y los mutualismos forman redes complejas de interdependencia entre decenas de especies, como es, por ejemplo, el caso de la red trófica de interacciones de dispersión de semillas por frugívoros en el Pantanal de Brasil que nos ha mostrado el nuevo académico, en la que interaccionan 91 especies: 46 de animales y 45 de plantas.

Estudiar la arquitectura de las redes complejas es importante para conocer la coevolución entre las especies que las componen, así como su mantenimiento. Para conocerlas hay que tener en cuenta varias propiedades que las caracterizan, como nos ha informado el Dr. Jordano: el grado, que es el número de interacciones o enlaces que se producen por cada nodo u organismo que las componen; el encajamiento, esto es, la forma en la que se distribuyen esas interacciones entre las distintas especies; la asimetría, que resulta de que cada enlace de interacciones entre dos especies tiene relaciones de dependencia recíproca no necesariamente equivalente; la asortatividad, cuando un nodo de un grado determinado tiende a interactuar con nodos de grado similar, y la modularidad, que es la tendencia de una red a organizarse en grupos o módulos distintivos de determinados nodos, tendiendo las especies de cada módulo (o grupo) a interrelacionar más entre sí que con las demás, una situación que muestra el ejemplo ya comentado de la red trófica compleja del Pantanal de Brasil, con cinco módulos claramente diferenciados.

De la modularidad deriva el papel de las especies dentro de la red, y su conectividad se mide por un coeficiente de partición que indica la importancia que la desaparición de determinadas especies puede suponer para la supervivencia del propio ecosistema.

Según la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, consultada el 2 de septiembre de 2022), están amenazadas 138.374 especies de animales y plantas superiores, de los que 38.543 (esto es, el 23%) están en peligro de extinción, muchos de ellos en peligro crítico. Para catalogar las especies en cualquiera de las nueve categorías de protección que reconoce, la UICN considera cuatro tipos de criterios basados en el tamaño de las poblaciones, su distribución y fragmentación y la duración de cada generación (UICN, 2001). Siguiendo estos criterios, las distintas organizaciones que la componen<sup>12</sup> proponen para su conservación especies animales o vegetales, cuya desaparición, en muchos casos, no significaría ni mucho menos la alteración o pérdida de los ecosistemas de los que forman parte.

Por la exposición del Dr. Jordano queda claro que la UICN debería añadir como criterio fundamental para proponer la protección de especies, sean animales o vegetales, su papel en las redes tróficas, para poder proteger preferentemente aquellas de las que depende el futuro de cada ecosistema.

Permítanme terminar mi intervención con algunos comentarios sobre el “breve paréntesis”, utilizando sus propias palabras, que ha dedicado el nuevo académico al desarrollo de la Ecología en España, basado en el magnífico estudio de nuestro académico D. Francisco García Novo, publicado en 2009 en el cuarto volumen de la serie “España siglo XXI”, dirigida por Salustiano del Campo, académico de la Real Academia de Ciencias Morales y Políticas, y por el tan denostado José Félix Tezanos, presidente del CIS (Centro de Investigaciones Socioeconómicas) (García Novo, 2009).

En lo que respecta a nuestro país, la Ecología como tal se puede considerar una ciencia reciente. Mi generación no pudo cursarla como materia propia en la universidad, pues no figuraba en los planes de estudio de 1953, y no se incorporó a las facultades de Biología o Ciencias hasta la década de los 60 del pasado siglo. Ramón Margalef fue el primer catedrático de Ecología de nuestro país en 1967, al ocupar una cátedra que se había dotado en la Universidad de Barcelona. Sería después, en 1987, el primer académico de honor de nuestra recién creada Real Academia Sevillana de Ciencias, que quiso reconocer así su enorme valía, su profundo conocimiento del medio natural y de los organismos que lo pueblan, tanto animales como vegetales, y sus extraordinarias dotes de observación. Fernando González Bernáldez fue el segundo catedrático de Ecología de nuestro país, al ocupar en 1970 una cátedra dotada en la Sección de Biología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Sevilla, actual Facultad de Biología.

Diversas circunstancias, impidieron que se incorporaran a la universidad en la época en la que lo hicieron Margalef y González Bernaldez otros dos grandes ecólogos: Pedro Montserrat, que hubiera sido catedrático de Botánica de la Universidad de Oviedo, y José Antonio Valverde, que lo hubiera sido de Zoología de la Universidad de Sevilla.

---

12. La UICN está formada por más de 1.400 organizaciones gubernamentales y de la sociedad civil, a las que contribuyen más de 15.000 expertos.

El nombre de la cátedra es lo de menos. Eran ecólogos integrales y contribuyeron notablemente al desarrollo de la Ecología desde sus puestos en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en el Centro Pirenaico de Biología Experimental el primero y en la Estación Biológica de Doñana el segundo.

El núcleo de ecólogos formados en la Universidad de Barcelona por el Prof. Margalef, y en Sevilla por el Prof. González Bernáldez y por el Prof. García Novo que lo sustituyó en 1976, fueron el germen para el gran auge que desde entonces ha tomado la Ecología en las universidades y centros de investigación españoles. A partir de entonces, el desarrollo de esta ciencia ha sido espectacular, y brillantes especialistas en este campo son, en lo que respecta a nuestra Academia, D. Francisco García Novo, D. Carlos Herrera Maliani, que pasó a petición propia a la condición de académico supernumerario, doña Montserrat Vilà, que tomó posesión como académica numeraria el día 21 del pasado mes de abril, y D. Pedro Jordano, que enriquece nuestra Academia con su incorporación hoy, igualmente como académico numerario.

Si he de resumir la personalidad del nuevo académico con pocas palabras, les diré que como científico es riguroso, autocrítico, exigente, honesto y humilde. Y como persona, amable, educado, generoso y comunicativo. Es sin duda una gran persona y un caballero, y va a ser un magnífico compañero de academia.

En nombre de la institución, y en el mío propio, quiero dar la más calurosa bienvenida al nuevo académico, de quien esperamos una activa participación en las actividades de la Academia, que va a beneficiarse de sus amplios conocimientos y de su gran prestigio como investigador.

## BIBLIOGRAFIA

- ALÍA MEDINA, M. (1976), Francisco Hernández-Pacheco de la Cuesta. In Memoriam. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid* **70(4)**: 691-694.
- ANDERSON, J.M., T. NUTTLE, J.S. SALDAÑA ROJAS, T.H. PENDERGAST & A.S. FLECKER (2011), Extremely long distance seed dispersal by an overfished Amazonian frugivore. *Proceedings of the Royal Society, B*. **278**: 3329-3335.
- ANÓNIMO (1926), Reseña de Diego Jordano Icardo. *Boletín de la Real Academia de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes de Córdoba* **17**: 278-279.
- BASCOMPTE, J. & P. JORDANO (2013), *Mutualistic networks*. Princeton University press, Princeton.
- BASCOMPTE, J., P. JORDANO & J.M. OLESEN (2006), Asymmetric coevolutionary networks facilitate biodiversity maintenance. *Science* **312(5772)**: 431-433.
- BOEDELTEJE, G., B. KLUTMAN, M. SCHAAP, P. SOLLMAN, M. DE VOS, J.P.M. LENSSEN & W.C.E.P. VERBERK (2019), Plant dispersal in a temperate stream by fish species with contrasting feeding habits: the role of plant traits, fish diet, season, and propagule availability. *Frontiers in Ecology and Evolution* 2019, (<https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00054>).
- COHEN, J.E. (1978), *Food webs and niche space*. Princeton University Press, Princeton.
- GARCÍA NOVO, F. (2009), La implantación de la Ecología en España. En C. Sánchez del Río, E. Muñoz y E. Alarcón (eds.) *España siglo XXI*, IV, *Ciencia y Tecnología*: 205-242. Madrid, Biblioteca Nueva.
- GORDILLO CAÑAS, A. (2005), In Memoriam. Profesor Dr. D. Juan B. Jordano Barea. *Anuario de Derecho Civil* **1**: 5-8.

- GOTTSBERGER, G. (1978), Seed dispersal by fish in the inundated regions of Humaitá, Amazonia. *Biotropica* **10**(3): 170-183.
- GRIMALDI, D. (1999), The co-radiations of pollinating insects and Angiosperms in the Cretaceous. *Ann. Missouri Botanical Garden* **86**: 373-406.
- HERRERA, C.M. & P. JORDANO (1981), Prunus mahaleb and birds: the high efficiency seed dispersal system of a temperate fruiting tree. *Ecological Monographs* **51**: 203-218.
- HERRERA, C.M., P. JORDANO, J. GUITIÁN & A. TRAVESET (1998), Annual variability in seed production by woody plants and the masting concept: reassessment of principles and relationship to pollination and seed dispersal. *The American Naturalist* **152**: 576-594.
- HERRERA, C.M., P. JORDANO, L. LÓPEZ-SORIA & J.A. AMAT (1994), Recruitment of a mast-fruited, bird-dispersed tree: bridging frugivore activity and seedling establishment. *Ecological Monographs* **64**(3): 315-344.
- JORDANO, P. (1981a), Relaciones interespecíficas y coexistencia entre el Águila Real (*Aquila chrysaetos*) y el Águila Perdicera (*Hieraaetus fasciatus*) en Sierra Morena central. *Ardeola* **28**: 67-88.
- JORDANO, P. (1981b), alimentación y relaciones tróficas entre los passeriformes en paso otoñal por una localidad de Andalucía central. *Doñana Acta Vertebrata* **8**: 103-124.
- JORDANO, P. (1982), Migrant birds are the main seed dispersers of blackberries in south Spain. *Oikos* **38**: 183-193.
- JORDANO, P. (1983a), Correlaciones ecológicas del consumo de frutos por los passeriformes durante la migración otoñal. *Alytes* **1**: 55-70.
- JORDANO, P. (1983b), Fig-seed predation and dispersal by birds. *Biotropica* **15**: 38-41.
- JORDANO, P. (1984), Seed weight variation and differential avian dispersal in blackberries *Rubus ulmifolius*. *Oikos* **43**: 149-153.
- JORDANO, P. (1986), Relaciones entre plantas y aves frugívoras en el matorral mediterráneo del área de Doñana. *Universidad de Sevilla, Publicaciones Tesis Doctorales y Tesinas*: 25-30.
- JORDANO, P. (1987a), Patterns of mutualistic interactions in pollination and seed dispersal: connectance, dependence asymmetries and coevolution. *The American Naturalist* **129**(5): 657-677.
- JORDANO, P. (1987b), Avian fruit removal: effects of fruit variation, crop size, and insect damage. *Ecology* **68**: 1711-1723.
- JORDANO, P. (1987c), Notas sobre la dieta no insectívora de algunos Muscicapidae. *Ardeola* **34**: 89-98.
- JORDANO, P. (1987d), Frugivory, external morphology and digestive system in Mediterranean sylviid warblers *Sylvia* spp. *Ibis* **129**: 175-189.
- JORDANO, P. (1988a), Diet, fruit choice and variation in body condition of frugivorous warblers in Mediterranean scrubland. *Ardeola* **76**: 193-209.
- JORDANO, P. (1988b), Polinización y variabilidad en la producción de semillas en *Pistacia lentiscus* (Anacardiaceae). *Anales del Jardín Botánico de Madrid* **45**: 213-231.
- JORDANO, P. (1989a), Pre-dispersal biology of *Pistacia lentiscus* (Anacardiaceae): cumulative effects on seed removal by birds. *Oikos* **55**: 375-386.
- JORDANO, P. (1989b), Variación de la dieta frugívora otoño-invernal del Petirrojo (*Erithacus rubecula*): efectos sobre la condición corporal. *Ardeola* **36**: 161-183.
- JORDANO, P. (1990a), Biología de la reproducción de tres especies del género *Lonicera* (Caprifoliaceae) en la Sierra de Cazorla. *Anales del Jardín Botánico de Madrid* **48**: 31-52.
- JORDANO, P. (1990b), Utilización de los frutos de *Pistacia lentiscus* (Anacardiaceae) por el Verderón Común (*Carduelis chloris*). En Arias, L., P. Recuerda & T. Redondo (eds.) Principios en Etología. *Actas I Congreso Nacional de Etología*: 145-153. Publicaciones del Monte de Piedad y Caja de Ahorros de Córdoba.
- JORDANO, P. (1991), Gender variation and expression of monoecy in *Juniperus phoenicea* L. (Cupressaceae). *Botanical Gazette* **152**:476-485.



- JORDANO, P. (1992), Fruits and frugivory. In Fenner, M. (ed.) *Seeds: the ecology and regeneration in natural plant communities*, Cap. 5: 105-156. Commonwealth Agricultural Bureau International.
- JORDANO, P. (1993a), Pollination biology of *Prunus mahaleb*: deferred consequences of gender variation for fecundity and seed size. *Biol. J. Linn. Soc.* **50**: 65-84.
- JORDANO, P. (1993b), Geographical ecology and variation of plant-seed disperser interactions: southern Spanish junipers and frugivorous thrushes. In A. ESTRADA & T.H. FLEMING (eds.) *Frugivory and seed dispersers: ecology and evolutionary aspects*: 85-104. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- JORDANO, P. (1994), Spatial and temporal variation in the avian-frugivore assemblage of *Prunus mahaleb*: patterns and consequences. *Oikos* **71**: 479-491.
- JORDANO, P. (1995a), Angiosperm fleshy fruits and seed dispersers: a comparative analysis of adaptation and constraints in plant-animal interactions. *The American Naturalist* **145**: 163-191.
- JORDANO, P. (1995b), Frugivore-mediated selection on fruit and seed size: birds and St. Lucie's cherry, *Prunus mahaleb*. *Ecology* **76**: 2627-2639.
- JORDANO, P. (2000), Fruits and frugivory. In FENNER, M. (ed.) *Seeds: the ecology and regeneration in natural plant communities*, ed. 2, Cap. 5: 125-166. Commonwealth Agricultural Bureau International.
- JORDANO, P. (2014), Fruits and frugivory. In R.S. GALLAGHER (ed.) *Seeds: ecology of regeneration in plant communities*, ed. 3, Cap. 2: 18-61. Commonwealth Agricultural Bureau International, Wallingford, UK.
- JORDANO, P. & C.M. HERRERA (1981), The frugivorous diet of blackcap populations *Sylvia atricapilla* wintering in Southern Spain. *Ibis* **123**(4): 502-507.
- JORDANO, P. & C.M. HERRERA (1995), Shuffling the offspring: uncoupling and spatial discordance of multiple stages in vertebrate seed dispersal. *Ecoscience* **2**(3): 230-237.
- JORDANO, P., L.F. LÓPEZ JURADO & M. RUÍZ (1980), mecanismos de la regulación de la temperatura corporal en el Eslizón Ibérico (*Chalcides bedriagai*). *Actas I Reunión Iberoamericana de Biología de Vertebrados*: 379-384.
- JORDANO, P. & J.A. TORRES ESQUIVIAS (1981), Importancia de la estructura de la vegetación en la selección del hábitat para la nidificación de una comunidad de rapaces diurnas mediterráneas. *Ardeola* **28**: 51-66.
- JORDANO, P., D. VÁZQUEZ & J. BASCOMPTE (2009), Redes complejas de interacciones mutualistas planta-animal. En R. MEDEL & M.A. AIZEN-REGINO ZAMORA (eds.) *Ecología y evolución de interacciones planta-animal*: 17-40. Santiago de Chile, Editorial Universitaria.
- LI, H.-T., T.-S. YI, L.-M. GAO, P.-F. MA & 19 autores más (2019), Origin of Angiosperms and the puzzle of the Jurassic gap. *Nature Plants* **5**: 461-470.
- LÓPEZ JURADO, L.F., P. JORDANO & M. RUÍZ (1978), Ecología de una población insular mediterránea de Eslizón Ibérico, *Chalcides bedriagai* (Sauria, Scincidae). *Doñana Acta Vertebrata* **5**: 19-34.
- MULDER, A.J., R. VAN AALDEREN & C.H.A. LEEUWEN (2021), Tracking temperate fish reveal their relevance for plant seed dispersal. *Functional Ecology* **35**(5): 1134-1144.
- MISOF, B., S. LI, K. MEUSEMANN, R.S. PETERS & 97 autores más (2014), Phylogenomics resolves the timing and pattern of insect evolution. *Science* **346**: 763-767.
- RODERO SERRANO, E. & A. RODERO FRANGANILLO (2011), Diego Jordano Barea (1918-2002). *Semblanzas Veterinarias* **3**: 345-362.
- TORRES ESQUIVIAS, J.A., P. JORDANO & A. LEÓN (1981), *Aves de presa diurnas en la provincia de Córdoba*. Publicaciones del Monte de Piedad y Caja de Ahorros de Córdoba.
- TORRES ESQUIVIAS, J.A., P. JORDANO & J. VILLASANTE (1980) Estructura y dinámica temporal de una colonia de búitre negro, *Aegyptius monachus*, en Sierra Morena central (Córdoba). *Boletín de la Estación Central de Ecología* **9**: 67-72.

- UICN (2001), *Categorías y criterios de la lista roja de UICN* (versión 3.1). UICN, Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido.
- VÁZQUEZ AROCA, R. (1918), *Instituto General y Técnico de Córdoba. Memoria leída en el solemne acto de apertura del curso de 1918 a 1919*. Córdoba, Imprenta Moderna.
- VILLASANTE, J., P. JORDANO & J.A. TORRES ESQUIVIAS (1981), *I censo de buitreras* (1979). Informe sobre Córdoba: 283-285.

## ***CONFERENCIAS***



***CURSO DE HISTORIA Y FILOSOFÍA  
DE LA CIENCIA Y DE LA TÉCNICA***



## LA MARQUESA DE CHÂTELET Y EL FUEGO

*Conferencia pronunciada por el  
Profesor Sr. D. Antonio Roselló Segado,  
dentro del ciclo “Historia y Filosofía  
de la Ciencia y de la Técnica”,  
el día 14 de marzo de 2022.*

### 1. EL PORTENTO

-5\*/Gabriela-Emilia la Tonnelier de Breteuil, marquesa de Châtelet, fue una mujer famosa en su época aunque según un abate cronista “*con más críticos que partidarios*”. Su popularidad tuvo que ver con sus ocho años de intimidad y otros siete de camaradería con Voltaire. Más adelante, los revolucionarios franceses que veneraron al escritor no se preocuparon de ensalzar a su pareja. Hogaño los criterios han cambiado y ahora se tiene a Châtelet por la *primera mujer sabia de la época moderna*, es el *genio osado de la Ilustración*, se la aclama como *el portento* del Siglo de las Luces. A las condolencias por una muerte prematura se une el lamento, o incluso la indignación, porque los prejuicios contra las mujeres doctas impidieran el reconocimiento de sus logros.

Esos logros no pudieron ser copiosos, puesto que Châtelet redactó su obra en sólo catorce años, y además entreverándola con las numerosas actividades personales, familiares y sociales que nunca abandonó. Su producción es de carácter misceláneo: tres textos relacionados con la moral (la traducción de la *Fábula de las abejas* de Mandeville, el *Análisis de la Biblia* y el *Discurso sobre la felicidad*) y tres con la ciencia (*Disertación sobre el fuego*, *Fundamentos de la física* y la traducción de los *Principios* de Newton). Los *Fundamentos*, planteados como un libro de texto para su hijo, y su versión de los *Principios*, a la que añadió una presentación excelente del sistema del mundo de Newton, son los mayores soportes de la reputación actual de Châtelet. No obstante, su primera publicación, la *Disertación sobre el fuego*, resultó determinante en su evolución como autora. Los elogios recibidos acabaron con la reluctancia a publicar de la marquesa, que en la versión final de la *Disertación* dio testimonio de un cambio radical en su pensamiento, la adhesión a Leibniz y a sus *fuerzas vivas*.

En 1733 con veintisiete años y cumplida la obligación de prolongar su linaje y el de su marido el marqués de Châstellet-Lomond, Emilie de Breteuil retornó a la intensa vida social programada para una alta aristócrata del Antiguo Régimen, en la que se propiciaban los intereses familiares y se satisfacían las pasiones propias. La marquesa tuvo una singular para su clase y género, la del conocimiento científico. De modo que estudió matemáticas y astronomía con el newtoniano Maupertuis, de la Academia de

Ciencias de París, estrella allí y en el café Gradot, al que patrocinaban las duquesas de Saint-Pierre, Aiguillon y Chaulnes, principales amigas de la marquesa. Después recibiría lecciones de Clairaut, niño prodigio llegado a joven prodigio, y König, un esquinado discípulo de Wolff. Así adquirió Châtelet ya de adulta una formación muy selecta al margen del cartesianismo imperante en la Francia de su época.

Junto con esa pasión por saber y otra igual de absorbente por cosas más frívolas, la marquesa tuvo la pulsión del amor. En los tiempos de iniciarse como estudiante de ciencias se reencontró con Voltaire. Su biógrafa Zinsser asegura que él “*la sedujo*” porque ella “*lo asombró*”. Tras un período de galanteo a lo largo de 1734 en París, al año siguiente la pareja decidió retirarse al castillo de Cirey, entre la Campaña y la Lorena, el país ancestral del marqués de Châtelet. Allí, atendidos por la servidumbre adecuada, se dedicarían al estudio, la reflexión y redacciones varias, experimentarían, ocuparían los ocios con lecturas de versos, teatro y tertulias. Pero además Cirey era un refugio lo bastante alejado del poder ministerial francés y de la rapidez y contundencia de su ejercicio. Si Châtelet había confinado allí al inquieto Voltaire para asegurárselo, el escritor había aceptado confinarse porque afrontaba una situación comprometida, ya que estaba a punto de publicar sus *Cartas filosóficas*.

## 2. EL CONCURSO DE 1738

En diciembre de 1736 Voltaire temió las consecuencias de otra de sus travesuras y huyó a Holanda. Allí visitó Leyden con un doble objetivo: consultar a Boerhaave sobre su siempre maltrecha salud y asistir a las clases de ‘s Gravesande para reafirmar su fe newtoniana. La consulta médica no prosperó, pero los experimentos de ‘s Gravesande [junto a Musschembroek, el máximo exponente de la física experimental holandesa] impresionaron tanto a Voltaire que volvió de su exilio en marzo de 1737 arrebatado de entusiasmo por la ciencia. Encargó costosos equipos y marchó a Cirey a terminar sus *Elementos de la filosofía de Newton*. Châtelet contribuyó a la redacción aprovechando los conocimientos adquiridos con Maupertuis. Voltaire lo agradecería representándola como su musa en el frontispicio del libro.

Empeñado en trocar su ocupación literaria y filosófica por la científica, Voltaire decidió en abril redactar una memoria para el concurso que la Academia de Ciencias de París convocaba cada dos años. El tema propuesto era *Naturaleza y propagación del fuego*. Los textos debían presentarse antes de septiembre, por lo que al escritor no le sobraba el tiempo. Ni los conocimientos, pero tenía un plan: compondría la memoria con su erudición filosófica, la consulta de varios libros de referencia en física y química, algunos experimentos a realizar en Cirey y una nueva colaboración con la marquesa de Châtelet, que en ese momento no tenía más obra propia que una traducción parcial de la *Fabula de las abejas*.

De alguna forma la propuesta de la Academia continuaba la precedente, un concurso sobre la luz en el que se premió el trabajo de Jean Bernouilli. Sin embargo, la cuestión a la que ahora tenían que responder los concursantes era más peliaguda. En la *Cyclopedia*



de Chambers (1728) se calificaba la naturaleza del fuego de "maravillosa y abstrusa", concluyendo que difícilmente podría encontrarse un asunto filosófico más importante y menos comprendido. En efecto, el fuego tenía que ver con casi todo: con la propia luz, con el calor y con la llama; pero también con los cambios de estado, con las combustiones y calcinaciones, con las fermentaciones. Por la polisemia del término *fuego* el objetivo del concurso quedaba inconcreto pero la intención de los académicos se inspiraba en los *Elementos de Química* de Boerhaave. En este clásico el apartado dedicado al "*fuego que los filósofos llaman fuego elemental*" comenzaba tratando de su naturaleza y continuaba con "*aquello que se llama el alimento del fuego*", un aspecto íntimamente relacionado con su propagación.

Boerhaave, al que llamaban "el preceptor de Europa", había revolucionado la enseñanza de la Química huyendo de "*hipótesis precarias*", advirtiendo que en tema tan complejo "*la circunspección es más necesaria que nunca*", adoptando el "*método analítico de los geómetras, que comienzan como si lo ignoraran todo*". Aunque asumía la filosofía mecánica de Newton no la aplicó a las fermentaciones, calcinaciones o disoluciones; o sea, a los procesos químicos que resultaban irreductibles a las fórmulas matemáticas. Para Boerhaave la química no era una ciencia del razonamiento y la deducción, sino que había que construirla a partir de los datos experimentales, buscando una tendencia uniforme en ellos. Lo que constituye su teoría de la química es ver cómo concuerdan las experiencias para establecer una verdad indudable. Ese empirismo radical realza el papel de los "instrumentos de la química", los del utillaje (como los hornos o los cierres) y aquéllos que inducen los fenómenos químicos: los disolventes, "*a los que los químicos llaman menstruos*", y los elementos clásicos convertidos en instrumentales. Entre ellos el fuego tiene importancia singular, según establece uno de los axiomas de Boerhaave: "*No hay operación química sin fuego*". Tal relevancia no era novedosa, sino la tradicional en el Arte. Los químicos habían filosofado con el fuego, utilizándolo tanto en análisis [para el metalúrgico Biringuccio la naturaleza del fuego era "*consumirlo todo, con una disminución de sustancias*"] como en síntesis [al considerarlo "*el disolvente más sutil de la naturaleza y también el agente más poderoso para unir cuerpos*"].

El fuego elemental de Boerhaave estaba uniformemente repartido por el universo y en todos los cuerpos que impregnaba, residiendo lo mismo en la materia más sólida (el oro) como en la más sutil (el vacío de Torricelli), a las que se acogía "*por movimiento y atrición*". Para investigar su naturaleza Boerhaave buscó un carácter que siéndole inseparable fuese fácilmente perceptible por nuestros sentidos. Lo encontró en el enrarecimiento que inducía: "*La rarefacción de los cuerpos por el fuego parece una ley primigenia de la naturaleza*".

La convocatoria del concurso incluía una cautela por la que no se restringían las explicaciones a ningún sistema en particular pero se advertía que eso no significaba apoyar los principios del sistema elegido. Durante el primer tercio del siglo XVIII la doctrina química predominante en Francia fue la de Boerhaave, ya que la del flogisto se popularizó más adelante. Por tanto, la advertencia no se refería a una posible controversia entre el fuego dilatador de Boerhaave y el fuego fijado de Stahl, sino que iba dirigida a

las teorías físicas ya enfrentadas en la institución: el sistema cartesiano de los vórtices y el pleno frente al newtoniano de las atracciones y el vacío.

Los amantes de Cirey llegaban a su nueva colaboración como militantes en el bando de los newtonianos, pero con propósitos y capacidades diferentes. Cuando Voltaire leyó al fin el libro de Boerhaave [lo que debió ser en junio de 1737] le gustó tanto el capítulo dedicado a los elementos instrumentales que pensó comentarlos en una eventual nueva edición de sus *Elementos de la filosofía de Newton*. En sus estudios de concursante buscaba otra demostración de la superioridad del sistema de Newton sobre el de Descartes y creyó encontrarla en el fuego de Boerhaave. Châtelet, sin ideas preconcebidas, pronto tuvo que darse cuenta de que Voltaire malinterpretaba los experimentos y a Boerhaave, ya que partiendo de ellos no cabía deducir un fuego compatible con la física newtoniana. Este conflicto la llevó a tomar una audaz decisión: presentar su propia memoria, lo que demostraría a la vez su discrepancia y su independencia. La escribió “*de noche y a escondidas* (de Voltaire, pero no de su marido)” y la remitió con gran secreto.

### 3. LA DISERTACIÓN DE LA MARQUESA

Voltaire escribió su *Ensayo* en unos cuatro meses y sin haber podido completar su plan experimental por su incompetencia como laborante químico. Pensó remediarla con la contratación de un abate que además de ayudar en el laboratorio dijera misa en Cirey, pero no hubo tiempo. La redacción de Emilie de Châtelet fue aún más apresurada, y otra demostración de la sobresaliente laboriosidad de la marquesa. Ella contó a madame de Graffigny, parienta lejana a la que tenía temporalmente acogida, que la composición de la *Disertación sobre el fuego* le llevó un mes y que decidió enviarla sólo dos semanas antes de cerrarse el plazo.

Puesto que durante la preparación de sus manuscritos Châtelet y Voltaire habían compartido lecturas, experimentos y reflexiones no es sorprendente que los textos se parezcan en muchos aspectos, aunque difieran en las conclusiones. Tienen en común el arriesgado planteamiento por el que los autores afrontaban la actividad omnímoda del fuego, con lo que tenían que tratar temas tan distintos como el calor, la luz, la electricidad, la elasticidad, el sol y otros astros, el clima, las fermentaciones, la fuerza vital... y más cosas. Con tanta materia y tan poco tiempo para redactarla Châtelet debió de sentirse insegura y afrontó el problema de la naturaleza del fuego con desaliento. Se decía que si al intentar desentrañarla habían fracasado sabios tan sagaces como Boyle, Lèmery, Homberg, Boerhaave, Musschenbroek o ‘s Gravesande ¿qué estaba a su alcance, sino conjeturas y probabilidades?

En efecto, Châtelet especula mucho en la *Disertación*, anunciando la defensa de la hipótesis que hace en los *Fundamentos de la física*. Y es que “*cuando se trata de los primeros principios apenas nos están permitidas más que conjeturas y verosimilitudes*” Aunque se retrae ante la misteriosa naturaleza del fuego tiene menos dudas en cuanto a su acción: los corpúsculos ígneos se esfuerzan por separarse unos de otros y al hacerlo inducen una fuerza que se opone a la de cohesión de los cuerpos en “*un combate per-*

*manente que... produce casi todos los fenómenos de la naturaleza*". Para explicarlos Châtelet recurre a dos principios tomados de Boerhaave: a) el fuego rarifica los cuerpos en los que se encuentra; b) el fuego no tiene peso, o de tenerlo no sería perceptible. Ahora bien, mientras que constatamos con facilidad la dilatación por el calor, que el fuego no pese resulta menos evidente. El razonamiento de Châtelet es que los cuerpos expuestos al sol se calientan (es decir, incrementan su fuego), sin que por ello pesen más; lo que no es sorprendente, dado que las innumerables partículas luminosas de los rayos solares percuten incesantemente en nuestros ojos sin que alcancen a herirlos ni sintamos siquiera su golpeteo.

Claro que un fuego imponderable no es medible mediante una balanza, pero con ella cabe demostrar de manera indirecta que el fuego no pesa. Châtelet repitió en una forja de su marido la experiencia del hierro frío y candente de Boerhaave, quién encontró que *"ocho libras de hierro, bien penetradas de fuego en toda su substancia"* pesaban lo mismo que cuando estaban frías. Châtelet lo confirmó: *"Puedo certificar la igualdad de peso en masas de hierro de veinte a dos mil libras, que pesé antes de que estuvieran inflamadas y después completamente frías"* Esa igualdad de una masa de hierro con distintas cantidades de fuego parece demostrar que éste no tiene peso, como quería Châtelet. Pero para Musschenbroek probaba lo contrario. Su argumento, que hizo fortuna, es éste: al calentarse el hierro toma fuego y se dilata; como el metal se pesa en el aire, a mayor volumen, menor peso; si el hierro candente pesa lo mismo que el frío es porque el peso del fuego que ha captado compensa el que ha perdido por flotación. Châtelet no se extraña de que el fuego tomado por el metal y el empuje que éste ha recibido del medio se igualen con tanta precisión. De manera que queda desarmada por el argumento de Musschenbroek y lo embarulla para no aceptar el fuego ponderable. Se pregunta si estamos seguros de que el hierro candente sólo ha captado fuego y no partículas de madera o carbón. Se contesta que no podemos estarlo, ya que esos contaminantes intervienen aun recurriendo al fuego más puro; es decir, el solar o celestial. Pero, entonces, ¿para qué andar pesando hierro con distintas cantidades de fuego?

La experiencia de Boerhaave mostraba que el hierro podía calentarse sin cambiar de peso, pero cualquiera que hubiese leído su libro conocía otro comportamiento de los metales al aplicarles fuego. Lo explicaba un perplejo Voltaire al abate Moussinot, su factótum: *"Sería bien singular que veinte libras de plomo calcinado pesaran cinco libras más y que mil libras de hierro ardiente no aumentaran su peso en un grano. He aquí, mi querido abate, lo que me tiene en jaque casi un mes"* Lo cierto es que los aumentos de peso como el del plomo calcinado se conocían desde hacía siglos y se comprobaban continuamente. Por ejemplo, la *Cyclopedia* ilustraba la corporeidad del fuego citando el caso de una muestra de mercurio puro que calentada suavemente durante un año pesaba más. Para incrementar el peso del metal bastaba el fuego solar, como ocurría en un experimento de Homberg citado por la marquesa: *"Cuatro onzas de antimonio puro expuestas al espejo del Palacio Real aumentan su peso durante su calcinación en tres dracmas y algunos granos, que es decir un décimo"*. Homberg siguió calentando la cal con el vidrio ardiente hasta fundirla y encontró que se perdía todo el incremento previo y un octavo más.

La contaminación con madera o carbón aducida por Châtelet para el hierro de su forja la había descartado mucho antes Boyle calcinando metales en vasos de vidrio grueso impenetrables al humo. Atribuyó el peso mayor de la cal al tránsito de unos átomos ígneos desde la llama externa hasta el metal puesto en el matraz sellado. Esta explicación era la generalmente aceptada en tiempos de la marquesa, asumida entre otros por Lèmery, Lefevre, Homberg o el padre Feijoo. Claro que Châtelet no podía compartirla y por ello estaba dispuesta a contradecir a Lèmery y a Boyle. En este caso negaba el peso del fuego argumentando así: *“Ninguno de los repetidos experimentos sobre cuerpos expuestos al fuego son iguales... En los de Boyle, el (variable) incremento de peso no debe atribuirse a una causa tan invariable como el fuego”* (porque Boyle encontró un incremento mayor en el hierro que en la plata).

Pero, entonces, ¿por qué pesaban más las cales? En su comentario a la experiencia de Homberg Châtelet propone dos causas para el aumento de peso del antimonio: a) porque la espátula de hierro utilizada para agitar la muestra pierde una masa que llega al antimonio calcinado; b) porque las sales y sulfuros, *“con los que el aire está siempre cargado”*, pueden haberse unido al metal con la ayuda del fuego y la agitación de la espátula. Para probar lo primero Châtelet podría haberse acordado de su aforismo (*“la experimentación es la gran maestra de la filosofía”*) y replicado la experiencia pesando la espátula antes y después de la calcinación. No lo hizo. Su segunda opción retornaba a las partículas aéreas que se venían proponiendo para explicar la respiración, la combustión o la calcinación. John Mayow, el gran experimentador presunto precursor de Lavoisier, propuso sesenta y cinco años antes algo parecido, y mejor, para justificar el aumento de peso del régulo de antimonio expuesto al sol: la incorporación al metal de las partículas de un espíritu nitro-aéreo, “etéreo e ígneo”, vago antecedente del oxígeno. Châtelet retomó partículas heterogéneas similares para explicar la secuencia completa del experimento de Homberg. Durante la calcinación las partículas se adhieren al metal y aumentan su peso. Al fundir se separan y el peso mengua. Pero, ¿por qué se reducía el peso en el segundo paso más de lo ganado en el primero? La marquesa lo atribuye a que *“todos los metales fundidos pierden peso”*. Con esta premisa Châtelet puede concluir que si con más fuego el metal fundido pesa menos es que el fuego no pesa. Podría haber concluido que su peso es negativo, pero la marquesa no llega a tanto. Junto con el aumento en volumen del fundido completa el balance con unas pérdidas del metal, evaporado por ese fuego violento.

Ya se habrá conocido que Châtelet no tiene problemas en recurrir a hipótesis ad hoc, en lo anterior para salvar la exigencia del fuego imponderable. También piensa, de nuevo siguiendo a Boerhaave, que existe una magnitud que computa el fuego regularmente repartido por el espacio, en cada ambiente y en cada cuerpo. En efecto, el progreso de la termometría desde inicios del siglo XVIII permitió determinaciones bastante fiables de la temperatura, a la que se consideraba medida de la cantidad de calor o de fuego con independencia de la masa del cuerpo. Esta creencia, que duró hasta mediados del siglo, implicaba que los cuerpos que estuviesen a una temperatura habrían fijado el mismo fuego; de manera que para Châtelet las veinte libras de hierro inflamado contenían el mismo fuego que las dos mil. La generalización no alcanzaba a los organismos vivos, ya

que sus temperaturas son mayores que las del medio en el que habitan. Châtelet concluye que han recibido más fuego [los animales más que los hombres] y acaba añadiendo a éste otra propiedad, la de principio de la vida. Ahora bien, un elemento ubicuo que muestra tanta actividad ha de ser controlado, ya que en su naturaleza está consumirlo todo, como decía Biringuccio. De no contenerlo acabaría destruyendo el universo. Por eso para la marquesa una de las muestras mayores de la providencia divina es haber creado un mundo en el que fuego ilumina más fácilmente que arde. De ocurrir al revés estaríamos expuestos constantemente a ser consumidos. Y muchas veces a oscuras.

Este fuego devorador aboca al problema de la combustión. ¿Por qué algo que no sentimos en nuestros ojos puede convertirlos en cenizas llegado el caso? Para tratar este fenómeno crucial Châtelet sigue a Boerhaave una vez más y recurre a su *pabulum ignis* (que en puridad no es un alimento del fuego, ya que de serlo éste aumentaría sin cesar). El *pabulum* es la parte más ligera y volátil de los cuerpos, por la que éstos arden “de acuerdo a sus respectivas densidades”. Al contrario que Voltaire Châtelet no se tromeó preguntándose por su naturaleza última, su relación con el principio azufre, si era un mixto o un simple, etc., sino que se planteó lo que hacía la combustión posible. La llama se extinguía y los animales morían en ausencia de aire (como Mayow, por ejemplo, viera en sus experimentos); por lo tanto arder y respirar precisaba de algo más que del nutriente del fuego. Para la marquesa la combustión combina el alimento del fuego, la elasticidad del aire y la presión de la atmósfera. Si el agua extingue la llama es porque evita las vibraciones del aire que la facilitan; mientras que un fuelle las aumenta, propagando el incendio.

Otro límite impuesto por el Creador al fuego se encuentra en los cambios de fase. La marquesa recuerda que Amonton, el fabricante de termómetros, constató que el agua hirviendo adquiere *un punto fijo de calor* que no se puede sobrepasar por mucho fuego que se aporte. Algo similar se encuentra en el paso de sólido a líquido. De modo que en los cambios de fase existe un equilibrio térmico en el que el cuerpo libera tantas partículas ígneas como está recibiendo y el contenido en fuego en ambas fases se iguala, como lo prueba la temperatura compartida. Esa isoterminia coexiste con una perceptible desigualdad en volumen. Así, como sabía muy bien Châtelet, el agua al congelarse aumenta su volumen de 8 a 9, por lo que al llegar el frío invernal estallan los recipientes que la contienen, y hasta cañones de pistola. Ante este hecho singular Châtelet razona que si el hielo fuese causado por la mera ausencia de fuego sería sólo agua congelada y el hielo sólido habría de ser más denso que el agua líquida. Pero como no es así la congelación debe tener otra causa a añadir a la pérdida de fuego. Aquí Châtelet vuelve a recurrir a las sales y nitratos del aire. Ahora estos corpúsculos heterogéneos inducen una agitación propia de la fermentación y actúan como refrigerantes. El agua pierde fuego con el clima frío, pero sólo se congela al combinarse con esas partículas que han ocupado sus poros abandonados por el elemento. Se forma así hielo, para la marquesa una especie química distinta del agua líquida. Lo demuestra que el hielo fundido se calienta con más dificultad que el agua y no sirve para preparar un buen café.

#### 4. TRAS EL CONCURSO

En diciembre de 1737 Maupertuis informó oficiosamente a la pareja de Cirey del fallo del concurso, que él calificaba de lamentable. Se premiaba a Leonhard Euler; al jesuita Lozeran de Fiesc; y al señor de Créqui, conde de Canaples. El fallo podía entenderse como un triunfo de la mayoría cartesiana de la Academia, porque cartesianos eran el cura y el conde; y aunque Euler no lo fuese en su trabajo aparecían la materia sutil y el éter, lo que permitía acomodarlo al cartesianismo. A eso aludía la marquesa cuando mostró su mal perder quejándose por carta a Maupertuis en marzo de 1738: “*Estamos desesperados viendo la decisión de la Academia. Es duro que el premio sea compartido y que M. Voltaire no tenga parte del pastel* (la marquesa no había informado aún a Maupertuis de su participación) – *Ese M. Fuller es un leibniziano y en consecuencia un cartesiano. Es desafortunado que el espíritu partidista tenga tanto crédito en Francia*”. Sorprende que la dolida concursante atribuya doctrinas a Euler por una memoria que ella no habría leído aún pero todavía más que ignorara quién era ese Fuller. Euler había ganado el segundo premio de la Academia en 1727, enseñaba matemáticas y física en San Petersburgo, acababa de publicar *Mecánica expuesta analíticamente* (1736), primera aplicación del cálculo infinitesimal en la disciplina, y, sobre todo, estaba muy relacionado con los Bernouilli, asiduos corresponsales de la marquesa.

Châtelet dijo que se interesó en el concurso por ayudar a Voltaire y que escribió su memoria para imitarlo, pero el entorno de ambos concluyó que la de ella era muy superior. El marqués de Châtelet la ensalzaba en sociedad y madame de Graffigny más todavía: “*Es de una claridad, de una precisión y de un razonamiento admirable; le pido perdón a M. de Voltaire, pero está muy por encima de él*”. Eso pareció asumirlo el propio Voltaire, que presentó a Federico de Prusia la *Disertación* de Châtelet como una obra maestra y batalló tanto o más por publicarla que con su *Ensayo*. Y es que ni él ni Maupertuis aceptaron el fallo y maniobraron hasta lograr alguna retribución a los esfuerzos de “*una joven dama de alto rango*” y “*uno de nuestros primeros poetas*”, (así los presentaba el abate Desfontaines el comentar sus memorias). En fin, la Academia tomó la decisión singular de que junto a los trabajos premiados se incluyeran en la relación otros dos a los que se concedía la impresión sin mencionar los nombres de los autores. Y ello “*porque suponen la lectura de muchos buenos libros de física y están llenos de puntos de vista y hechos muy bien expuestos*”. Es decir, se premiaba la erudición bien escrita por personas de calidad. Las memorias de Châtelet y Voltaire se publicaron en 1739, convirtiendo a la marquesa en la primera mujer incluida en la selecta compilación anual de la Academia de Ciencias.

El reconocimiento público y privado a su *Disertación* hizo crecer mucho la confianza y expectativas de la señora de Châtelet. Ya antes de que la obra se publicara la utilizó para introducirse en el mundillo científico con el que hasta ese momento sólo tenía una amigable relación epistolar. Maupertuis repartió copias a su requerimiento. La de Federico la remitió personalmente la autora, advirtiéndole al príncipe prusiano que la científica de Cirey era ella. También le comunicó que estaba redactando un libro de texto para *el hijo al que tan tiernamente amaba*: los *Fundamentos de Física*. Tal vez por

esa intención pedagógica los *Fundamentos* no sólo trataban de física, sino también de epistemología y metafísica. En esta obra Châtelet adoptaba el pensamiento de Leibniz, autor por el que hacía poco menospreciara al tal Fuller. Su adhesión llegó más allá de la dinámica leibniziana, hasta el principio de razón suficiente y a sostener que nuestro mundo es el mejor de los posibles. Por eso Voltaire deploró que la marquesa hubiese acabado “*convertida a la religión de las mónadas*”. En una conversión tan rápida pudo existir alguna epifanía que convenció a Châtelet de la trascendencia de las *fuerzas vivas* de Leibniz.

La polémica de las fuerzas vivas, las que inducen el movimiento de los cuerpos, se había iniciado veinte años antes de que naciera Châtelet con un artículo de 1686 en el que Leibniz advertía de lo que calificó de *memorable error de Descartes*, al que habría ofuscado el funcionamiento de las máquinas simples. El error era confundir la fuerza motriz con la cantidad de movimiento. De ahí podía seguirse que  $mv$  era la magnitud a conservar en el universo. Frente a esto Leibniz proponía una fuerza motriz relacionada con  $v^2$ , como aparecía en la expresión de Galileo para la caída libre de los cuerpos. A pesar de la contundente argumentación de Leibniz y su provocador desafío a los cartesianos la confrontación apenas prosperó en ese momento. Ya entrados en el siglo XVIII el punto de vista de Leibniz había convencido a Wolff, Hermann y Jean Bernouilli, pero lo que reavivó la polémica fueron los datos experimentales de Poleni, profesor en Siena, (1718) y de Gravesande (1722), ambos apuntalando la formulación de Leibniz. Dortous de Mairan, sucesor de Fontenelle como secretario de la Academia, intervino publicando *Disertación sobre la estimación y medida de las fuerzas motrices* (1728), obra que Châtelet empezó alabando porque “*sus razonamientos iban a desengañar al mundo del error de las fuerzas vivas*”. Pero tras la visita de Voltaire a Leyden fue otro el desengaño. Al conocer los experimentos en los que Gravesande medía las depresiones que producía en un lecho de arcilla la caída libre desde distintas alturas de distintas esferas el poeta tuvo que “*abandonar el sistema de la cantidad de movimiento, a pesar de guardar una estima infinita por M. de Mairan*”. De manera que hacia mayo de 1738 la opinión en Cirey (y en su entorno: Bernouilli, Maupertuis, Clairaut) era que “*los efectos siempre los produce la masa por el cuadrado de la velocidad*”.

La impresión de la *Disertación* coincidió con la redacción de los *Fundamentos de Física*, donde Châtelet se extendía en la presentación de las fuerzas vivas. De no ser aceptadas, enfatizaba la marquesa, el mundo dejaría de ser estacionario y no habría certidumbre para el conocimiento humano. Por eso Châtelet corrió a situarse junto a ellas, solicitando incluir unas *erratas* en la *Disertación* que se estaba imprimiendo para que también allí apareciera su reciente hallazgo. Lo hacía forzando un paralelismo entre la acción del fuego y la de las fuerzas vivas y muertas: al igual que la fuerza mecánica contenida en un cuerpo no se anula al quedar éste en reposo, el fuego conserva la suya aun en estado de inacción. Châtelet asemejaba el comportamiento de la fuerza ígnea al de la fuerza mecánica, pero sin establecer relaciones entre ellas: “*El movimiento no produce fuego*” o “*El fuego no es responsable del movimiento, sino del movimiento interno de las partículas de los cuerpos*”.

En la tradición de la Academia no estaba la corrección de un manuscrito a publicar, pero la marquesa insistió y consiguió introducir parte de sus *erratas*. Tales exigencias pudieron influir en su desencuentro con Mairan, pero la causa principal del conflicto fue la mención crítica del secretario que hizo Châtelet en los *Fundamentos de Física*, en cuyo capítulo XXI se contraponían posturas a favor y en contra de las fuerzas vivas. Esto acabó en una polémica de la marquesa con Mairan que ella aceptó gustosa, de la que se consideró apabullante ganadora y con la que aumentó su autoestima de mujer científica.

## 5. EN CONCLUSIÓN

Châtelet participó en el concurso del fuego con muchas prisas y con un tema que difícilmente habría elegido para debutar como autora. Pero lo cierto es que con la *Disertación* salió del anonimato y se convirtió en una escritora cuyo estilo alababa Voltaire por “*la claridad, la precisión y la elegancia*”. Al iniciar su carrera de mujer de letras la marquesa se había propuesto conformarse con transmitir la ciencia de otros, ya que decidió que había llegado tarde a la edad de adquirir talentos pero no a la de ser razonable: “*Sintiendo que la naturaleza me ha negado el genio creativo que descubre nuevas verdades, me he hecho justicia y estoy contenta de reproducir con claridad las verdades que otros han descubierto*”. Es lo que hizo en la *Disertación* y lo que le reconocía la Academia imprimiendo su memoria.

Claro que más allá de los hechos empíricos citados con profusión en su trabajo Châtelet tenía más especulaciones que verdades para divulgar. Un comentario reciente sobre el concurso hace hincapié en que las memorias que ahora recordamos son las de Euler, Châtelet y Voltaire, las no cartesianas. Esto se deberá a la notoriedad de los autores, no a que sus obras desbrozaran el futuro. Porque ¿qué aportaba a la ciencia ilustrada la *Disertación*? Si Châtelet no la hubiese publicado ¿en qué habría cambiado aquella? Una de sus biógrafas escribe que la obra “*muestra una amplia lectura de las autoridades y es una combinación de experimentación, reflexión e hipótesis*”. Pero el hecho es que la marquesa “*no dio nuevos datos experimentales ni ofreció una nueva teoría científica... No descubrió ni la naturaleza del fuego ni las leyes que gobiernan su propagación*” Lo esencial de la teoría que sostiene su memoria ya estaba en un libro de texto muy conocido al que Châtelet siguió de cerca, también en sus errores: como que la temperatura medía el contenido en fuego de un cuerpo sin importar su masa, o que el calentamiento de un metal y su calcinación eran el mismo proceso. Por eso la *Disertación* no pasa de ser una recapitulación competente del pensamiento confuso de la época sobre “*el más caliente, bello, leve y activo de los elementos...*”, como lo definía nuestro *Diccionario de Autoridades*. Y es que no iba descaminado Dortous de Mairan al calificar de “erudita” la *Disertación* de Châtelet. No obstante, hay quién ha encontrado en la memoria intuiciones asombrosas acerca de las radiaciones fuera del espectro visible o la relación entre el calor y la energía, una magnitud entonces inexistente.



Aunque lo usual es considerar a la marquesa de Châtelet geómetra y física, se la ha nombrado además *ayudante química de los salones ilustrados*. En cierto modo la *Disertación* justificaría el nombramiento, pero el título resulta inapropiado por varias razones: porque la relación científica de Châtelet con Voltaire no fue la de una mera auxiliar, sino la de colaboradora necesaria; porque la marquesa acudía a los salones no a cultivar la ciencia sino su ludopatía; y porque su interés por el Arte fue ocasional, inclinada como estaba a las matemáticas (“la única ciencia que amaba, y la única verdadera”) aplicadas a la física y a la astronomía. Y eso que no le faltaban talentos para progresar en química: tenía sentido común, demostró que era capaz de superar los prejuicios de escuela, valoraba mucho la experimentación y era propensa a calcular. Con tal bagaje podría haberse alejado de las causas a priori y dirigido hacia los balances a los que tendería la química en la segunda mitad del siglo XVIII. Pero Châtelet no intentó nada de eso ni aclaró ninguna de las cuestiones químicas que en su época estaban sin resolver. Cierto que resolver algunas era una tarea tan formidable que de hecho implicaba una revolución.

Los obstáculos que afrontó la marquesa como científica fueron parecidos a los de sus colegas, que ni la ignoraron ni la menospreciaron por su género. A la vez valoraron su Ilustre linaje, lo que le procuró una condescendencia añadida. Los rasguños que recibió fueron los usuales entre científicos, de su época o de cualquier otra; en todo caso, más leves que los que le infligieron los de su clase social. En fin, que Châtelet tuvo menos motivos para quejarse de su trato con los intelectuales que con los aristócratas del Antiguo Régimen. Considérese la pendencia con Mairan: una mujer no afecta a la doctrina oficiosa de la Academia de Ciencias recibe de la institución un honor singular pero aun así no deja de pedir excepciones y polemiza ásperamente con el secretario de la corporación. Pues bien, la Academia la trató con la extremada deferencia que supuestamente merecía “una joven de la clase más alta que honra a nuestras ciencias por el gusto que tiene por ellas”.



# **EL MISTERIO DE “LAS MESAS GIRATORIAS”. POLÉMICA ENTRE CIENCIA, IGLESIA Y ESPIRITISMO EN LA ESPAÑA DEL OCHOCIENTOS**

*Conferencia pronunciada por el  
Doctor Sr. D. Javier Almarza Madrera,  
dentro del ciclo “Historia y Filosofía  
de la Ciencia y de la Técnica”,  
el día 18 de abril de 2022.*

## **INTRODUCCIÓN CON APUNTES SOBRE ESPIRITISMO**

Es un lugar común en el siglo XIX el interés por el mundo de lo espiritual, de la trascendencia del alma humana tras la muerte, ese fenómeno natural presente al final de la vida de toda persona, de cualquier edad o posición. Morir era y sigue siendo cierto, y con la muerte se cuenta y se convive porque hay pocos medios para combatirla. En la Europa de mediados del XIX se puede morir por hambre, por enfermedades comunes hoy pero entonces letales, por falta de asepsia, por accidente o por un azote de violencia. La muerte acompañaba la vida desde el propio nacimiento, con tasas altísimas de mortalidad infantil, y aunque siempre dolorosa, se la afrontaba con un dramatismo más resignado y asumido que hoy. El paso siguiente, tras el duelo, puede ser el deseo de los vivos de seguir en contacto con los seres queridos que ya iniciaron el viaje sin retorno, dejando su cuerpo atrás y trascendiendo en otro plano fuera del material, en la forma de alma o espíritu. Había, por tanto, que buscar los medios y el lenguaje con los que conectar esos dos mundos y establecer la comunicación deseada con un individuo en concreto. Nació así el *espiritismo* como doctrina que aboga por la inmortalidad del alma y estudia, sobre esta creencia, los diferentes estados en los que se encuentra, sus características incorpóreas y, sobre todo, el modo de poner en contacto el mundo en el que habitan los difuntos con el que aún ocupan los vivos. *El espiritismo cree en la pluralidad de mundos habitados, la multiplicidad de existencias del alma y la comunicación entre los seres visibles e invisibles de la especie humana*<sup>1</sup>. *El espiritismo no niega la existencia de Dios, pero sí entra en conflicto con muchos de los dogmas de la Iglesia Católica.*

Pero ya había entre los vivos un mundo de espíritus que aparecían sin ser convocados: eran los fantasmas, que en este siglo XIX causaban terror, pero también pasión y

---

1. B.N.E. *Revista espiritista. Periódico de estudios psicológicos*, Año II, nº 1. Barcelona, enero de 1870, p. 1.

fueron protagonistas de las páginas de la mejor literatura europea. Sirva de modelo la literatura inglesa, donde, por poner un mínimo ejemplo, en las obras de las hermanas Brontë o de Charles Dickens se pasean espectros que despiertan en el mortal que los contempla instantes de terror, de evocación de los seres amados o, también, lo llevan a situaciones surrealistas cargadas de comicidad. Internémonos, pues, en la atmósfera de los fenómenos extraños, de su afición y de su investigación, que tuvo pendientes a diversos sectores del mundo de la ciencia y de la religión, atribuyéndose la obligación de darles explicación y, de no hallarla, de denostarlos y condenarlos.

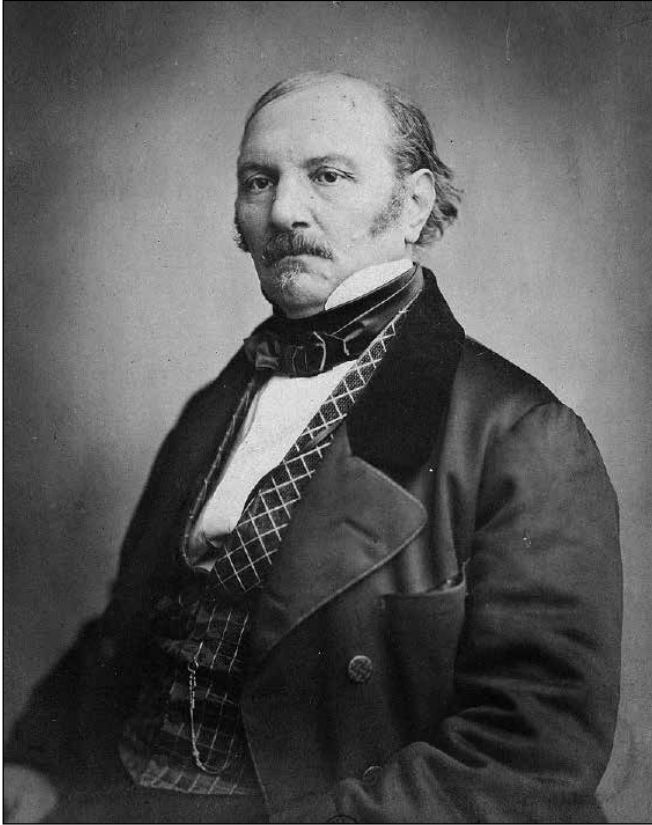
Allan Kardec (1804-1869)<sup>2</sup>, que sistematiza la doctrina espiritista, reconoce expresamente en su *Libro de los espíritus*, aparecido el 18 de abril de 1857, que el inicio de las ideas espiritistas nació con la observación del movimiento espontáneo de diversos objetos inanimados. A estos fenómenos le acompañaban sonidos extraños e inarticulados, golpes, etc., que fueron asociados con los intentos de comunicación de las almas de los muertos. Entre ellos estaba el vulgarmente conocido con el nombre de “mesas giratorias” o “danza de las mesas”, de los que también él fue testigo. Todos estos prodigios, escribe de nuevo Kardec, podían explicarse por la presencia de fenómenos eléctricos, que también se manifiestan inexplicable y violentamente en efectos como los rayos, el magnetismo, el lanzamiento a distancia de cuerpos pesados por efectos de ese rayo, el desarraigo de árboles, etc. Pero no era esta la explicación, por su falta de norma, pues no seguía siempre una regla fija. Por lo tanto, comenzó a construirse la idea de que aquel movimiento de objetos procedía de una potencia inteligente de modo que, al ser preguntados a través de un código de golpes o movimientos precisos, fueron los propios espíritus los que se reconocieron como ejecutores de aquellas acciones, es decir, que el espiritismo no fue una invención de nadie, sino producto de la declaración de las mismas almas de los difuntos.

Kardec no negaba la existencia de un dios soberano, eterno y justo, creador de todas las cosas, incluidos los seres humanos, pero creía en la multiplicidad de mundos habitados. Es más, Dios había escogido a la especie humana para la “encarnación de los espíritus que habían llegado a cierto grado de desarrollo [...]”. Para él alma y espíritu son sinónimos. “Los espíritus [dice Kardec como mensaje a la doctrina católica] son las almas de los que han vivido sobre la tierra o en otros mundos, despojadas de su envoltura corporal. Quien admite la existencia del alma sobreviviendo al cuerpo, admite por eso mismo la de los espíritus; negar los espíritus sería, negar el alma”. Por consiguiente, tres cosas existen en el hombre: 1ª el cuerpo o ser material análogo al de los animales, y animado por el mismo principio vital; 2ª el alma o ser inmaterial, espíritu encarnado en el cuerpo, y 3ª el lazo que une el alma al cuerpo, principio intermedio entre la materia y el espíritu (al que se denomina *periespíritu*). La muerte no es más, para Kardec y el espiritismo, que “la destrucción de la envoltura exterior [...]; una vez libre de este peso, no le queda ya más que su cuerpo etéreo, que le permite recorrer el espacio y franquear las distancias con la rapidez del pensamiento”<sup>2</sup>.

---

2. Allan Kardec es el seudónimo del profesor Hippolyte León Denizard Rivail (Lyon, 1804-París, 1869). Fue el principal defensor de la explicación espiritista en el fenómeno de las mesas giratorias y

ALLAN KARDEC (1804-1869). © BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DE FRANCE. GALLICA



Las evidentes divergencias en la consideración que por el alma tenían espiritistas y católicos produjeron un conflicto de intereses que no tardaría en aflorar. Digo de intereses porque para el catolicismo, la gestión y el cuidado de las almas después de abandonar su cuerpo es una exclusiva potestad del Dios creador, que tiene reservada para cada una un destino y una fase diferente de estado del que dichas almas no pueden salir libremente.

---

de la capacidad de los objetos, demostrada en el caso de las mesas parlantes, de convertirse en intermediarios entre los espíritus y el mundo de los vivos y del papel de los *médiums*. “Las instrucciones dadas por los espíritus de un orden elevado sobre todos los asuntos que interesan a la humanidad, las contestaciones que han dado a las preguntas que se les han hecho, recogidas y coordinadas con cuidado, constituyen toda una ciencia, toda una doctrina moral y filosófica, bajo el nombre de Espiritismo. El Espiritismo es, pues, la doctrina fundada en la existencia, las manifestaciones y la enseñanza de los espíritus”. KARDEC, Allan. “El espiritismo al alcance de todos: explicación dada por los espíritus, enseñanza y manifestaciones de los mismos”, en B.N.E. *El criterio espiritista*. Madrid, 20 de diciembre de 1868, p. 53-63.

## ¿QUÉ ERAN LAS MESAS GIRATORIAS?

El fenómeno de las mesas giratorias, o de *la danza de las mesas*, tuvo su origen en los Estados Unidos en 1846, extendiéndose con rapidez por todo el país y pasando a Europa, arraigando y desarrollándose en Francia como en ninguna otra nación. Junto a otras manifestaciones paranormales dieron origen al espiritismo como nueva filosofía, o incluso para algunos, como nueva rama de la ciencia<sup>3</sup>. Un experimento tipo estaría formado por la reunión de unas cinco o seis personas de ambos sexos, sentadas alrededor de una mesa, generalmente de buena madera como la caoba. Todos ponían sus manos sobre la tapa de la mesa y las unían entre sí por medio de sus meñiques formando lo que se llamaba una *cadena magnética*.

Un participante de una de estas sesiones nos cuenta en 1853, en la revista *El Espiritismo* de Sevilla, que formada la cadena, “durante media hora no hubo novedad; pero habiéndose cansado uno de los operadores, joven de 14 años, ocupó su puesto otro caballero muy nervioso, y cinco minutos después de este cambio la mesa empezó a oscilar, y en seguida a girar con tanta velocidad que tiró al suelo a una de las señoras que formaban la cadena”<sup>4</sup>. En otras ocasiones la experiencia se hacía con un velador (mesa pequeña de un solo pie y generalmente redonda), o un sombrero que en el centro de la mesa y tras un tiempo de formada la cadena, comenzaba a girar o a dar saltos. Hay quien apuntaba distintos comportamientos de los objetos y tiempo de reacción según el tipo de madera de la mesa, el cambio de postura de los dedos en contacto (porque la mesa, al parecer, giraba en la dirección que marcaba el dedo meñique sobrepuesto al del compañero), e incluso una orientación en el movimiento de los mismos hacia un determinado punto cardinal, o la facultad de los objetos de comunicarse y revelar hechos del porvenir.

Continuaba nuestro testigo diciendo que:

“la cadena se formó a la altura del pecho por cuatro personas, dos de cada sexo, y colocando los [dedos] izquierdos sobre los derechos. El operador cerró los ojos. A los cinco minutos empezaron a ser muy perceptibles las oscilaciones, y poco después se pronunció el movimiento giratorio de derecha a izquierda. Cambiados los dedos, se detuvo el movimiento, hubo fuertes y prolongadas oscilaciones, y después empezó a girar de derecha a izquierda. El experimento duró unos quince minutos, y poco antes de concluir, los que formaban la cadena sentían perfectamente la vibración de los nervios del paciente [el operador o médium]. Este, teniendo los ojos cerrados, no sentía el movimiento giratorio, y la sensación que experimentaba era la de figurarse que era más ligero que una pluma, casi como si estuviese suspendido en el aire”<sup>6</sup>.

---

3. Allan Kardec (1859). *Qu' est ce que le spiritisme?*

4. Biblioteca Nacional de España (B.N.E.). TORRES SOLANOT, Vizconde de. “Polémica a propósito del espiritismo”, en *El Espiritismo*. Sevilla, 1 de marzo de 1877, p. 141-142.

5. Publicado en B.N.E. *El Clamor Público*. Madrid, 15 de mayo de 1853, p. 2.

6. *Ibidem*, p. 2.

UNA SESIÓN DE “MESAS GIRATORIAS” EN LA PORTADA DE *LA ILUSTRACIÓN*. MADRID, 21 DE MAYO DE 1853. ©BIBLIOTECA VIRTUAL DE PRENSA HISTÓRICA



Muchos de los síntomas lógicos de las largas esperas, pendientes de una reacción de la mesa, fueron el cansancio y el hormigueo en las manos. Un gacetillero de *La España* relató que había sentido dolor en los antebrazos, dolor convulsivo, dolor muy semejante al de las afecciones reumáticas, y que le habían obligado algunas veces a romper la cadena por su violencia. Sin embargo, un ferviente defensor de la teoría magnética animal como Christophe Beckensteiner, autor en 1868 de *Études sur l'électricité. Application de l'électricité au début des maladies et moyen de les éviter*<sup>7</sup>, mantenía que el dolor se producía en personas que emitían mucho fluido eléctrico, pero en quienes lo recibían el efecto era el de una sensación de bienestar y plenitud<sup>8</sup>.

Era inevitable que todos estos fenómenos fueran relacionados con las teorías de Franz Mesmer (1734-1815), el médico y filósofo alemán que descubrió el pretendido magnetismo animal, un fluido invisible que permitiría el funcionamiento del cuerpo humano, y de cuyo desequilibrio o mala distribución nacerían las enfermedades. Devoto de la astrología médica, es decir de la influencia de los astros en las personas y en su aplicación al método médico, Mesmer practicó también la curación con imanes, incluso pensó que la fuerza de su propio magnetismo personal era la que obraba la curación de sus pacientes, a quienes aplicaba la imposición de manos y la hipnosis. Mesmer tam-

7. *Estudios sobre la electricidad. Aplicación de la electricidad al inicio de las enfermedades y cómo evitarlas.*

8. BECKENSTEINER, Christophe. “Experimentos sobre las mesas giratorias”. Extracto de un artículo publicado en *L'Art Medical*. B.N.E. *El criterio médico*. Madrid, 25 de octubre de 1866, p. 481-484.

bién organizaba estas sesiones con varios pacientes en círculo, con dos de ellos en los extremos sujetando barras metálicas sumergidas en soluciones hidroelectrolíticas, que causaban un flujo eléctrico transmisible a los circunstantes. No consiguió, sin embargo, la adhesión de la profesión médica a sus métodos, ni de las academias científicas del momento. Plasmó sus teorías, conocidas bajo el nombre de “mesmerismo”, en *Mémoire sur la découverte du magnétisme animal* (1779)<sup>9</sup>, explotó comercialmente su método y se hizo muy rico.

### **LAS MESAS TAMBIÉN GIRAN EN ESPAÑA**

En España se conocían estas reuniones de las mesas y sus fenómenos por lo publicado en la prensa extranjera, reproducidas luego en periódicos nacionales. Se tomaban fundamentalmente de revistas médicas francesas, que trataron el asunto en numerosos artículos, siempre desde la prudencia, pero dando visos de realidad al fenómeno, y minimizando su importancia científica. La investigación debía centrarse, si acaso, en ver si el prodigio procedía de fenómenos naturales hasta ahora ignorados, o si sólo se trataba de la manifestación de un conocimiento ya dominado por la ciencia.

Los primeros “experimentos” de magnetismo llevados a cabo en España con las mesas giratorias se realizaron en Aranjuez el 8 de mayo de 1853. Tal fue el éxito e impresión que se llevaron los presentes en la demostración, que la propia Isabel II pidió que se repitieran el día siguiente en su presencia<sup>10</sup>. A las cinco de la tarde de aquel lunes la reina y el rey, con sus respectivas servidumbres, fueron al palacete de la Casa del Labrador (en el Jardín del Príncipe de Aranjuez). Los acompañaron la reina madre, María Cristina, y Pedro María Rubio, médico de cámara de la reina y miembro fundador de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. En la prueba no tomó parte directa la reina, evitando así los riesgos de la exposición magnética. Los que sí sintieron en sus cuerpos los mágicos resultados fueron los caballerizos de campo y oficiales de las escoltas, tales como “los efectos de la cadena magnética que sobre ellos hacían sus compañeros. La marcha de progresión en ambos rumbos, como el girar de las mesas, como la aplicación de la cadena al cuerpo humano”<sup>11</sup>. Las pruebas fueron un éxito y la familia real se retiró convencida de la autenticidad del fenómeno.

En Madrid se reiteraron los experimentos y fueron objeto de asombro y recreo de todas las sociedades, muy repetidos en el Ateneo y el Casino, pues superada la incredulidad inicial, las muchas experiencias realizadas, incluso por los más descreídos, demostraron que las mesas y objetos se movían realmente al realizar la cadena humana. Esta era una verdad incontestable.

---

9. *Memorias del descubrimiento del magnetismo animal*.

10. Hemeroteca Municipal de Sevilla (H.M.S.). *El Porvenir*. Sevilla, 17 de mayo de 1853, p. 3.

11. Noticia publicada en *La Nación*, sin fecha determinada. Ver B.N.E.



SESIÓN CLÁSICA DE “MESAS GIRATORIAS”. (DETALLE DE PORTADA). LA ILUSTRACIÓN. MADRID, 21 DE MAYO DE 1853. © BIBLIOTECA VIRTUAL DE PRENSA HISTÓRICA



De una diversión social pasó rápida y progresivamente a convertirse en una actividad de exclusiva utilidad espiritista, y fue el espiritismo el que la normalizó, la desarrolló y extrajo de ella derivaciones de experiencias nuevas para facilitar la comunicación directa con las almas de los fallecidos, como la *ouija*. Porque inmediatamente vino la segunda interpretación, la de que los espíritus de los difuntos usaban las mesas y objetos en ella depositados como medio de comunicación. Así, los movimientos, golpes y saltos se consideraron un lenguaje en respuesta a las preguntas formuladas por los actuantes. El sistema más sencillo era el de plantear cuestiones cuya respuesta fuera una afirmación o una negación, identificadas con los golpes precisos ordenados por el *médium* y ejecutados por el espíritu. De ahí se pasó al uso del abecedario y las tablas de cifras, con un sonido de confirmación cuando una vara o un dedo señalaba la letra correcta para componer una palabra o frase. Las preguntas versaban fundamentalmente sobre la vida privada, pero también sobre temas de actualidad, de la fortuna futura o de la resolución de problemas personales si el espíritu en cuestión era el de un amigo o familiar. Para los incrédulos, seguía sin respuesta cómo el, o los, *médiums* lograban controlar el movimiento para inclinar las respuestas hacia un lado o hacia el otro.

## LA CIENCIA EN BUSCA DE EXPLICACIONES

Allan Kardec defendía que, al ser el espiritismo el resultado de una convicción personal y que este no pertenecía al mundo de la materia, la ciencia, sin menospreciarla, era, incompetente para alcanzar un fallo sobre el espiritismo. No debería ocuparse de él y que su veredicto fuera favorable o contrario, carecía de importancia. “Al tratarse de manifestaciones que se sustraen a las leyes de la humanidad [decía Kardec], no es competente la ciencia material porque no puede ser explicada ni por medio de los números, ni por medio de la potencia mecánica”; pero esa “injerencia” de los científicos no tardaría en llegar, pues se les presentaba un goloso y atractivo fenómeno para la investigación.

La comunidad científica no se mantuvo al margen del debate, sin poner freno a la curiosidad y los deseos de llegar al fondo de todas las cuestiones que la caracterizan. Pensó, en una primera etapa, que el movimiento o convulsión de las cosas podía producirse por la energía magnética generada por los cuerpos o alguna otra manifestación desconocida del fenómeno eléctrico. Pero algo no cuadraba con esto, pues los resultados eran variables y no respondían a la igualdad de derivaciones que se espera de los fenómenos naturales, en situaciones iguales, y que responden a normas y leyes generales inamovibles. La batalla se libraría en los medios periódicos escritos: boletines, revistas científicas y médicas, católicas unas o espiritistas otras y, en cantidad abundante, en la también abundante prensa diaria del momento.

En España, el médico Carlos Lúcia y Martínez, de Segorbe (Castellón), conocido por obras como *Higiene del cólera e instrucciones administrativas y populares para oponerse a dicha enfermedad*, de 1866, o sus impugnaciones a la doctrina de la Homeopatía y su creador Samuel Hahnemann<sup>12</sup>, había remitido en junio de 1853 al *Boletín de medicina, cirugía y farmacia*<sup>13</sup> una carta en la que contaba los resultados de sus experimentos. Según ellos concluía, aunque no definitivamente, que las mesas se movían realmente, así como los objetos que se dejaban sobre ella, como vasos, libros, platos, sombreros, etc. Observó que incluso no era necesario formar la cadena de manos, ni que las personas estuvieran en contacto entre sí, pero que los dedos sí debían tocar firmemente la tabla. Esto significaba que no existía transmisión de fluidos de tipo eléctrico o magnético, y que esta no era la causa de estas experiencias tan dinámicas. Todo ello le hacía pensar que el movimiento venía del impulso dado por los presentes, mayor cuanto más cansancio acumulaban y mayormente transmitidos cuando todos giraban a la vez en el mismo sentido de la mesa.

En fin, que todas las partes involucradas en el asunto, incluso los que no actuaron como testigos presenciales, aceptaron la verdad de las manifestaciones físicas descritas en los testimonios escuchados. Para explicar el fenómeno surgieron, por tanto, dos grupos:

---

12. AGUILAR MORELLÁ, Vicente (1997). “Carlos Lucia y Martínez. Una personalidad médica en el Segorbe del siglo XIX”. *Boletín de Investigación Fundación Bancaja*, nº 5. Julio 1997, p. 66.

13. B.N.E. *Boletín de medicina, cirugía y farmacia. Periódico oficial de la Sociedad Médica General de Socorros Mutuos*, nº 128. Madrid, 12 de junio de 1853, p. 6.

- 1º) Los que opinaban que el movimiento de mesas y objetos se producía por la influencia de un cierto fluido imponderable e invisible que algunos llamaban magnético, otros lumínico, calórico, o etéreo, o todos ellos en conjunto, que poseían y podían transmitirse todos los hombres. Podría llamarse a esta la “teoría de los fluidos”.
- 2º) Una segunda hipótesis, que descartaba el poder de estos fluidos y veía la razón de las manifestaciones de las sesiones magnéticas y espiritistas en la intervención de los espíritus, la que podríamos llamar “teoría de los espíritus”. Dentro de esta teoría se distinguirían dos grupos, en la definición que dio de ellos el coetáneo Padre Ceferino González (1831-1894), obispo de Córdoba:
1. Espiritistas: Que renuevan las doctrinas de Pitágoras, Platón y Orígenes de Alejandría, y suponen que las almas humanas están sujetas a una serie de encarnaciones y reencarnaciones sucesivas, viviendo en diferentes astros y lugares en relación con los cuerpos a los que se hallan unidas. Estas almas intervendrían en la evocación y fenómenos del magnetismo trascendental, que sistematizó Allan Kardec.
  2. Espiritualistas: Sus seguidores atribuyen los fenómenos magnéticos a la intervención de los ángeles y demonios. Esta teoría sería la más cercana a la Iglesia Católica.

Las voces de la ciencia hablaron. La Academia de Ciencias de París negó, no el hecho de los efectos vistos durante las experiencias, sino que estos tuvieran su origen en los fluidos eléctricos o el magnetismo. El propio químico inglés Michael Faraday (1791-1867), descubridor de la inducción electromagnética, padre del electromagnetismo y la electroquímica, toda una autoridad en este terreno, dio su versión sobre los hechos. Conforme con lo expresado por los naturalistas alemanes, mantuvo que el movimiento de los objetos se producía por efecto de una actividad vibratoria muscular involuntaria. Para demostrarlo construyó un aparato con el que dejó claro que ni electricidad ni magnetismo podían ser los causantes del giro de las mesas, los sombreros y demás efectos vistos<sup>14</sup>. Lo explicó todo en un artículo publicado en *Times* el 28 de junio de 1853<sup>15</sup>.

La aparición en escena de la Iglesia Católica era inevitable. Si para los científicos se trataba de combatir una superstición, para la iglesia era la lucha contra una herejía. Consideraba que el auténtico conocimiento y la gestión de las almas humanas eran asunto suyo, y ninguna organización o creencia podría atribuirse el poder de contactar con las almas de los difuntos y actuar con ellos, sacándolas del orden que para ellas había establecido Dios. La Iglesia católica española no dejó de alzar su voz condenatoria contra lo que juzgaba un entretenimiento ridículo de gente ociosa y frívola que derivaba en una superstición abominable. Condenaba especialmente que hombres sin fe ni creen-

---

14. B.N.E. *La Ilustración, periódico universal*. Madrid, 30 de julio de 1853, p. 298.

15. National Library of New Zealand. <https://paperspast.natlib.govt.nz/newspapers/NZSC-SG18531015.2.8>. Consulta: 29/03/23.

cias previas en espíritus ni en el porvenir, se dejaron convencer ahora por las supuestas facultades premonitorias de las *mesas giratorias*, y en seguir directrices y pensamientos marcados por meros objetos inertes a los que se les investía de una virtud sobrenatural. En este sentido, el cardenal arzobispo de Toledo manifestó dicha postura en una pastoral en la que reprobaba y condenaba la práctica de las mesas giratorias como injuriosa a la religión y peligrosa a la fe de los incautos<sup>16</sup>. El obispo de Cádiz y catedrático de Filosofía Juan José Arbolí, publicó una larga pastoral en la que advertía del peligro contra la fe y la moral cristianas de la publicación de textos difusores de las ideas espiritistas, especialmente dos opúsculos publicados en la ciudad andaluza<sup>17</sup>. En un tono quizás excesivamente alarmista ante la amenaza contra la religión, enarbolaba la bandera de la defensa de la doctrina, reclamando a la Iglesia tomar parte activa sin caer en el inmovilismo o la confianza. Entre los muchos postulados sacrílegos y blasfemos que a entender del obispo estas obras difundían, la mayor abominación llegaba cuando atribuían a los palanganeros -pues las cadenas magnéticas se formaban también alrededor de este mueble para acoger la palangana y el jarro para el agua- palabras y mensajes contrarios a la palabra de Dios y de su hijo en la tierra. El juego de los *palanganeros*, decía el obispo Arbolí, “es parte integrante de un sistema anti-social y anti-cristiano; que es para cierta clase de personas el púlpito de la nueva religión que algunos soñadores esperan ver establecida sobre la ruina de nuestros altares”<sup>18</sup>.

Otras voces desde la iglesia pensaban, como se publicó en *El consultor de los párrocos. Revista de ciencias eclesiásticas*<sup>19</sup> de Madrid en 1876, que “la magia, el mesmerismo, el magnetismo, el sonambulismo, el espiritismo, etc., no son sino *satanismo*, [y que] en el espiritismo hay hechos que indudablemente deben atribuirse a Satanás”, o que “toda falsa secta, como toda ciencia falsa o todo arte de iniquidad, es *satanismo*. Satanás es el padre de la mentira”. Para el teólogo jesuita francés Jean Pierre Gury (1801-1866) en su *Compendium Theologiae Moralis*, tomo 1, los fenómenos del espiritismo, incluidas las mesas giratorias, los que son reales, “pertenecen a la acción material del demonio”, pero hay otros efectos que son producto del artificio y la superchería.

En 1877, con el espiritismo plenamente desarrollado y sus ideas difundidas por todo el mundo, el padre fray Juan Vilá, del Orden de Predicadores, dio su opinión sobre el

---

16. B.N.E. Revista católica, nº 142, 1854, p. 347.

17. Las obras eran REGNAUD, Hipólito (traducción de Israim). Mancomunidad: vista sintética sobre la doctrina de Ch. Fourier (con un folleto aparte titulado Apéndice a la obra Mancomunidad, por los editores: Explicación psicológica sobre las mesas parlantes; confirmación de la teoría cosmogónica de Carlos Fourier y su sistema de asociación, sacado por medio de dichas mesas). Cádiz: Imp. de la Revista Médica, 1854, 212 p.; y JOTINO y ADEMAR. *Luz y verdad del espiritismo: opúsculo sobre la exposición verdadera del fenómeno, causas que lo producen, presencia de los espíritus y su misión*, 1857.

18. B.N.E. *La Esperanza*. Madrid, 31 de marzo de 1857, p. 2-3. ARBOLÍ y ACASO, Juan José (Obispo de Cádiz). Pastoral dada el 19 de marzo de 1857. El texto íntegro de la misma puede hallarse en este diario.

19. *El consultor de los párrocos. Revista de ciencias eclesiásticas*, Madrid, 7 de mayo de 1876, p. 174.

**DIVERSAS REVISTAS CIENTÍFICAS, CATÓLICAS Y ESPIRITISTAS DONDE SE DESARROLLÓ EL DEBATE ESPAÑOL SOBRE LAS “MESAS GIRATORIAS”.  
©BIBLIOTECA NACIONAL DE ESPAÑA**



asunto desde las páginas del diario católico *El Siglo Futuro*<sup>20</sup>, y lo hizo esta vez apoyándose en lo demostrado por los trabajos científicos. Defendió que los fenómenos de las mesas giratorias no eran de origen natural, ni se regían por las leyes de la física, que eran constantes y que “las causas naturales y necesarias producían siempre idénticos resultados dadas las mismas circunstancias”. Las mesas se movían en sentido horizontal, unas veces se elevaban sobre una de sus patas, otras saltaban incontroladamente y, a menudo, hasta empujaban bruscamente y con gran violencia a los circunstantes que llegaban a rodar por el suelo. No había, según demuestra la ciencia, fluido que se comportara así cuando actuaba sobre los objetos.

La teoría espiritista sostenía que todos los efectos que se daban en el juego de las mesas, de los mecánicos, los fisiológicos y psicológicos, eran causa de la acción de las almas de los muertos. Esto, según el padre Juan Vilá entraba en contradicción con la enseñanza de Santo Tomás que decía que una vez el alma se separaba del cuerpo que ocupó dándole la vida, esta se hallaba incapacitada para mover ningún otro cuerpo. Las almas, sencillamente, no vuelven a otro ser, ni pueden transmitir movimiento a los objetos de su alrededor. Según la doctrina católica, y en palabras de fray Juan, tres son los estados en los que puede encontrarse el alma al salir de un cuerpo que ha llegado al final de su ciclo vital:

20. B.N.E. *El Siglo Futuro*, nº 569. Madrid, 27 de agosto de 1877, p. 2.

1. Morando en la gloria disfrutando del fruto de sus trabajos y recibiendo el premio de su virtud aquilatada.
2. Purificando en un lugar de expiación los pequeños errores cometidos en vida, hasta alcanzar la satisfacción de Dios.
3. Condenándose, por el rigor de Dios, en las llamas del infierno, por las maldades y atrocidades cometidas en vida, por los pecados, en suma, que presidieron su existencia.

El alma separada del cuerpo está completa y absolutamente sometida a la voluntad de Dios, y su destino no puede ser cambiado ni manipulado por otro poder distinto. ¿Cómo podría entonces el *médium* convocar y utilizar a estas almas, hacerlas responder a sus preguntas, y representar situaciones a veces violentas, otras cómicas y ridículas ante el público de sus sesiones de espiritismo? Pues, sencillamente, de ninguna manera. Sólo queda contar con que se trate de la acción de los ángeles buenos o de los ángeles infernales, que sí están capacitados para producir estos fenómenos sobrenaturales, como el desplazar cuerpos sin tocarlos o trasladarse a cualquier lugar en cualquier momento, incluso simultáneamente. Pueden producir espectros y apariciones, sonidos, y dar respuestas por palabra, por escrito y por señales a cosas que se les pregunten sirviéndose de los miembros y el cuerpo de los *médiums*. Pero como los espíritus o ángeles buenos están dirigidos por Dios, es un atrevimiento atribuirles las acciones de las que hace gala el espiritismo. La solución católica, única admisible por la religión, pero también por la razón y la ciencia, según fray Juan Vilá, es atribuir las manifestaciones del espiritismo a las acciones de los espíritus infernales. Estos poseen verdaderamente una fuerza capaz de esquivar las leyes de la naturaleza, y dar lugar a fenómenos sobrenaturales, inexplicables y sobrecogedores. Las mesas y los *médiums* son los medios de los que se sirven para engañar a los ignorantes y a los incrédulos.

Por otra parte, Antonio María Lleó, que fue profesor de Física, Química e Historia Natural del Seminario Conciliar Central de Valencia, doctor en Teología y bachiller en Ciencias, en su obra *Lo que es el espiritismo. Su naturaleza, su autoridad y su doctrina*, dirigió un ataque directo contra el espiritismo. Le acusaba de anticatólico y atribuía su existencia y acción a los “ángeles de las tinieblas”, dirigidos a “hacer mal a los hombres y [...] alejarlos de la verdad católica”<sup>21</sup>. La obra recibió una crítica muy positiva por parte de la Iglesia Católica. En el *Boletín Oficial Eclesiástico del Arzobispado de Valencia*, se la defendió por combatir el espiritismo como falsa doctrina, que no procede de Dios, pero tampoco de los espíritus buenos<sup>22</sup>. El autor Lleó mantuvo una activa polémica con el director de *Revista espiritista*, que respondió siempre en tono conciliador y esperanzado en la conversión de Lleó al espiritismo, al comprobar que no altera las creencias en Dios y Jesucristo, sino que las amplía descubriendo nuevas manifestaciones del poder del Criador. Esta revista se fundó en Barcelona en 1869 como *Revista*

---

21. B.N.E. *La Ilustración Popular Económica*. Valencia, 10 de junio de 1870, p. 4.

22. B.N.E. *Boletín Oficial Eclesiástico del Arzobispado de Valencia*, nº 455. Valencia, 2 de junio de 1870, pp. 171-173.

*espiritista. Periódico de estudios psicológicos*, y en Sevilla se editaría en 1870 la revista *El Espiritismo*. Ambas eran una plataforma desde las que se divulgaban los principios del espiritismo y se traducían los pensamientos de su padre ideológico Allan Kardec, incluyendo en sus páginas muchos testimonios recogidos por este en relación al fenómeno de las mesas giratorias.

Entre las obras escritas en nuestro país, y quizás la más importante, para refutar las teorías eléctricas o mágicas de las *mesas giratorias*, contamos con la del sevillano Vicente Rubio y Díaz (1833-1900) *Estudios sobre la evocación de los espíritus, las revelaciones del otro mundo, las mesas giratorias y los trípodes y los palanganeros en sus relaciones con las ciencias de observación, la filosofía, la religión y el progreso social*. Fue publicada en Cádiz en 1860<sup>23</sup>, donde realmente desarrolló su fructífera carrera intelectual y pedagógica.

Bachiller en ciencias y licenciado en ciencias exactas, Vicente Rubio fue uno de los primeros frutos maduros de calidad nacidos de la Escuela Industrial Sevillana. Precisamente dedicó su obra sobre las mesas giratorias a su director y catedráticos. Fue alumno aventajado, obteniendo tras los estudios y por oposición, la plaza de ayudante de matemáticas en la propia escuela, explicando también la asignatura en el colegio San Fernando de Sevilla<sup>24</sup>. En junio de 1857 obtuvo por oposición la cátedra de Elementos de Ciencias Aplicadas de la Escuela Industrial de Cádiz<sup>25</sup>. Y siguió sumando méritos: catedrático de Física de ampliación en la Facultad de Ciencias, presidente de la Academia provincial de Bellas Artes, correspondiente de la Real Academia Sevillana de Buenas Letras, autor de varias obras científicas y literarias, etc.<sup>26</sup>

Coetáneo y testigo del furor causado por la nueva distracción de las mesas en Sevilla y participante en algunas sesiones de *cadena magnética*, su obra fue un intento de desmentir, desde el punto de vista estrictamente científico, las supercherías ligadas al mundo del espiritismo, luchando contra esas que llamaba “epidemias de credulidad pública” que cíclicamente se repetían a lo largo de la historia de la humanidad. Una primera parte de la obra constituye el resumen y correspondiente refutación de las teorías que sustentaban al nuevo pensamiento espiritista. En la sección segunda, titulada *Historia de las mesas parlantes. Evocaciones y manifestaciones de los espíritus*, manifestaba

23. RUBIO Y DÍAZ, Vicente. *Estudios sobre la evocación de los espíritus, las revelaciones del otro mundo, las mesas giratorias y los trípodes y los palanganeros en sus relaciones con las ciencias de observación, la filosofía, la religión y el progreso social*. Cádiz: Imp. de la Revista Médica, 1860, 181 p.

24. CANO PAVÓN, José Manuel. “La Escuela Industrial de Comercio y Náutica de Cádiz”, *LLULL*, vol. 23, 2000, p. 21-22. Su nombramiento consta en un documento fechado en 15 de enero de 1857, conservado en A.H.U.S., Legajo 581. En 1857 ganaría por oposición la cátedra de elementos de ciencias aplicadas (física, mecánica y química) en la Escuela Industrial de Cádiz. Más tarde, sería catedrático de Química aplicada a las artes y director del Instituto de Cádiz, con nombramiento de 12 de noviembre de 1863 y ocupando el cargo durante 32 años.

25. H.M.S. *El Porvenir*. Sevilla, 8 de julio de 1857, p. 1.

26. Biblioteca Virtual de Prensa Histórica (B.V.P.H.). ÁLVAREZ ESPINO, Romualdo. *Real Academia Gaditana de Ciencias y Letras. Inauguración del año académico de 1878 a 1879*. Cádiz: Imp. de la Revista Médica, 1878, p. 49.

no haber querido incluir ninguna experiencia de la que hubiera sido testigo por varias razones: por no querer ser juez y parte, por no haber tomado nota de las preguntas y respuestas dadas, y por no recordar la fecha ni las personas que habían operado en aquellos encuentros y, en general, porque estos no habían sido muy satisfactorios ni pródigos en fenómenos extraños. Tan sólo afirma haber tenido éxito en una ocasión en la que vio un trípode (banquillo o mesa de tres pies) componiendo unos versos; por lo demás el resto de sesiones fueron fallidas. Parece evidente, no obstante, que Vicente Rubio se reservó fechas, lugares y nombres de los participantes en estas sesiones simplemente por no comprometer a sus también curiosos compañeros de experiencia, máxime cuando la Iglesia había encabezado una activa cruzada contra este fenómeno tachado de herético. No creo, por tanto, en la teoría de la pérdida de memoria de situaciones tan excepcionales como esta. Asienta, por tanto, sus teorías en las experiencias vividas y publicadas por otros, y sobre todo en leyes físicas y matemáticas admitidas e inamovibles para la auténtica ciencia, nacidas de un pensamiento racional. Vicente Rubio admitía que el movimiento de las mesas y los trípodes se producía realmente, y que el *médium* podía componer palabras (esos presuntos mensajes del más allá) con el desplazamiento espontáneo hacia las letras correspondientes del alfabeto, pero la explicación que daría a los fenómenos no saldría de los cálculos matemáticos y mecánicos admitidos.

Alineado en defensa de las ciencias, la historia y la religión creía necesaria una respuesta contundente ante la expansión en el seguimiento de estas y otras *manifestaciones sobrenaturales* del espiritismo o secta espiritualista, como él la definía, que habían tenido gran predicamento por la abundante bibliografía aparecida, fundamentalmente de origen francés, que él conocía muy bien. Estamos ante una obra de refutación o respuesta, y no de un tratado científico, cuyo lenguaje es coloquial para hacerse premeditadamente más inteligible, siendo amena e incluso divertida en algunos pasajes. Presenta muchas transcripciones literales de los teóricos del espiritismo y de obras científicas que puedan acallar sus voces.

Vicente Rubio llamaba a la movilización de los hombres poseedores de formación científica, para adoptar una posición activa en orden a aleccionar en el razonamiento lógico a los crédulos convulsivos. Pedía no guardarse el conocimiento para sí, sino transmitirlo al ignorante haciendo de ello profesión de fe. Esta especie de sabios estaba conformada para Rubio por todos los que se dedican al cultivo de la inteligencia, dedicándose al público por las cátedras, en los libros o en los periódicos, es decir, profesores, eruditos, literatos e incluso los filósofos<sup>27</sup>. No entraba en contradicción con la idea del dios católico, en el que creía, hacedor en último término de todas las leyes que rigen en la naturaleza, de modo que el final de la obra bien parece una pastoral eclesiástica, con constantes referencias a su supremo poder.

Dice Rubio:

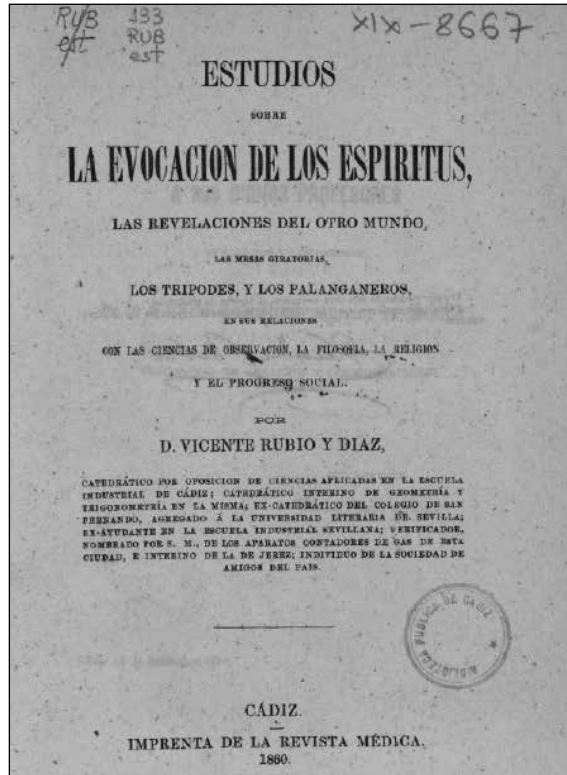
“Dios, en su inmensa sabiduría, ha querido poner un límite a todo lo que es humano. Los conocimientos del hombre en el mundo físico y en el moral, están

---

27. RUBIO Y DÍAZ, Vicente. Ob. cit., p. 114.



VICENTE RUBIO Y DÍAZ (1860). *ESTUDIOS SOBRE LA EVOCACIÓN DE LOS ESPÍRITUS, LAS REVELACIONES DEL OTRO MUNDO, LAS MESAS GIRATORIAS Y LOS TRÍPODES Y LOS PALANGANEROS EN SUS RELACIONES CON LAS CIENCIAS DE OBSERVACIÓN, LA FILOSOFÍA, LA RELIGIÓN Y EL PROGRESO SOCIAL.* ©BIBLIOTECA PÚBLICA DE CÁDIZ



circunscritos a una esfera que no puede extralimitar impunemente. Sus facultades intelectuales y físicas, también tienen el sello de la limitación, que distingue al hombre de Dios”<sup>28</sup>.

Desdeña las teorías que otorgaban a la electricidad el poder de generar la vida, crear y regir el universo, sostenidas por los que padecían la llamada *fiebre eléctrica* o *delirio eléctrico*.

En cuanto a las *mesas giratorias*, o los objetos sobre ellas, no creía que se movieran por sí solos, en consonancia con las leyes de transmisión del movimiento. “Y no se nos diga que lo movió el espíritu y que ESTA ES LA CAUSA, pues le haremos este argumento dilemático”, y continua con su demostración de que un espíritu, sea corpóreo o incorpóreo, no puede empujar objetos<sup>29</sup>. Por supuesto que tampoco creía en las influen-

28. *Ibíd.*, p. 177.

29. *Ibíd.*, p. 37.

cias demoníacas. El argumento final y mayoritario de los autores científicos fue que las mesas se movían por la presión de las manos sobre ella, y que los ruidos y respuestas de los “espíritus” a las preguntas de los actuantes eran contestadas por el *médium* por arte de su capacidad ventrílocua. Rubio reforzaba su teoría preguntándose si estos movimientos no estaban producidos con la ayuda de trucos de *mecánica y física recreativa* como los que utilizaban los magos, prestidigitadores y escamoteadores en la escena.

Vicente Rubio también sospechaba de lo absurdo y repetido de las preguntas que el *médium* hacía al espíritu; lo inútiles que eran las respuestas para la humanidad y su progreso. Para explotar la pretendida superioridad de estos seres, por qué no preguntar: ¿de dónde proviene el cólera y cuales son los medios para prevenirlo y curarlo? o ¿cómo se cura la tuberculosis?, o sobre resolución de dudas astronómicas o sobre qué sucesos se producirán en el orden político o moral del país<sup>30</sup>.

El libro tuvo una buena difusión a nivel nacional, con la publicación de reseñas en la prensa de la capital, pero entre los comentarios que de él se hicieron, hubo de molestarle especialmente el aparecido en el madrileño *La Correspondencia de España*, por el que el diario consideraba increíble que una persona ilustrada y de talento hubiera empleado en refutar lo que llamaba una ridícula farsa, y peor aún que estos hombres de ciencia lo hayan hecho para confirmar la falsedad de estas manifestaciones, como hizo el propio Michael Faraday<sup>31</sup>. Claro que la respuesta del sevillano no tardaría en llegar. Aquella afirmación se oponía al activismo necesario para luchar contra las supercherías y al deber de la ciencia de rebatir siempre con sus argumentos racionales la ignorancia o la equivocación. Sólo ocho días después, el periódico publicaba las objeciones hechas por Rubio y la advertencia sobre los peligros del avance de una secta que ya en Estados Unidos había conseguido que un palanganero o una mesa se convirtieran en oráculos para resolver las más graves cuestiones, considerándose su fallo inapelable y creyéndose en ellos con la fe del fanatismo religioso.

Se defendía Rubio resaltando que en Francia eminentes científicos como el químico Michel Eugène Chevreul (1786-1889), habían publicado obras de refutación contra las mesas giratorias y el espiritismo, como *De La baguette divinatoire du pendule dit explorateur, et des tables tournantes (De la vara adivinatoria y de las mesas giratorias, 1854)*, o el físico y matemático Jacques Babinet (1794-1872)<sup>32</sup>, autor en 1853 de una obra de oposición al fenómeno, titulada *Les tables tournantes (Las mesas giratorias)* y, por último, el médico, químico y físico, pero sobre todo divulgador científico, Louis Figuier (1819-1894), con su obra *Le lendemain de la mort ou la vie future selon la science*<sup>33</sup> (*El día después de la muerte o la vida futura según la ciencia*). Ninguno de estos

---

30. *Ibidem*, p. 169.

31. B.N.E. *La Correspondencia de España*. Madrid, 4 de diciembre de 1860, p. 1.

32. Babinet. *Les tables tournantes*. Extracto de la "Revue des Deux Mondes", (París), año XXIV, 1854, pp. 408-419.

33. "The term spiritualists is applied to the partisans of a new superstition which sprung up in America and Europe in 1855, as a result of the moral malady of table-turning. These good people imagine that they can, by their will, and according to their fancy, cause the souls of the dead, of great men, or of their own relatives and friends, to descend to the earth. They evoke the soul of Socrates

ARTÍCULO “EL MISTERIO DE LAS MESAS GIRATORIAS”, PUBLICADO EN ALMANAQUE BAILLY-BAILLIERE. MADRID, 1927. ©BIBLIOTECA NACIONAL DE ESPAÑA.

122

### EL MISTERIO DE LAS MESAS GIRATORIAS

*El singular y sorprendente fenómeno de la mesa giratoria fué producido por primera vez hacia 1850 por el escocés Douglas Home. Cuenta la tradición que fué en un momento de gran entusiasmo y que se levantaba con ella hasta cuatro al cielo. Esto es dudoso, pero lo que es cierto es que se pueden obtener momentáneamente asombrosos resultados de las mesas.*

**El medio de hacerlas girar.**

**Dirección de la mesa y de los asistentes.**— El efecto es preferencia una mesa ligera, como un velador de tres pies. Esta condición no es absolutamente necesaria. Tampoco lo es el número de los pies, pues se han visto mover mesas muy pesadas. Para el velador es más móvil y para un primer experimento conviene evitar las dificultades. Por tanto, aminorar conviene la cantidad de personas. En rigor, una sola bastaría para hacer girar la mesa, pero sería preciso que esta persona estuviera dotada de facultades psíquicas y ejercitadas, lo que constituye un medio. En regla general, cuando se estudia, se agrupa quien es o quien no es médium, es decir, individuos a los que se atribuye el fenómeno. El éxito del experimento es en lo que respecta al medio.

**En movimiento.**— Las personas presentes, colocados alrededor de la mesa, ponen las manos tocándose todas por los dedos medios, de modo que forman una corona, un círculo cerrado. No es necesario ninguna concentración de pensamiento. Después de una espera, que puede ser muy larga cuando los experimentadores un están ejercitados y durante la cual se toca a veces sobre los brazos, una especie de corriente de electricidad, se producen rechacimientos más o menos vivos en el espesor de la madera. Los cables se hanido al nombre de raps. Luego, la mesa empieza a mover, a golpe por con una o más pies y a ejecutar un movimiento de rotación, que parece independiente de la voluntad de los asistentes.

Se presiona que la mesa llega a levantarse por completo del suelo algunas veces, como si las fuer de la pesada estuvieran una interposición.

Finalmente, y es lo más curioso, cuando se presiona a la mesa giratoria, responde al impulso con el pie sobre el suelo de la mesa, a veces asombrosas, en sucesivas, en consonancia con el número de dedos de las letras del alfabeto. Así se ha llegado a mensajes completos, a veces asombrosos.

Para poner la mesa en movimiento, se sitúan sobre ella las manos de los asistentes tocándose por los dedos medios.

**Interpretación de sus movimientos.**

**Superchería y buena fe.**— La cuestión está en averiguar si esta fuerza aparentemente misteriosa que mueve las mesas, proviene uno de las personas que la rodean. La idea más natural que se presenta es la de una superchería. Si la fuerza fué de los asistentes no es dudosa, habrá que pensar que una de ellas puede ser el origen de impulsión inconsciente y que el deseo de ver el fenómeno puede ser a veces a la mesa en sus movimientos. Indudablemente, gran número de hechos desvirtúan estas frases voluntaristas y más frecuentemente involuntarios. En muchos casos se hace difícil a la mesa pedirse lo que se quiere ver o lo que se teme dudar. **Un misterio por aclarar.**— Para todo no se explica de esta manera, porque circunstancias asombrosas llevan a pensar que a menudo el hecho sucede como el ensayo de los experimentadores un hábil desconocido cargo de importantes conocimientos, de potencias inconscientes. Los efectos obtenidos parecen tan independientes del querer y de la competencia de los experimentadores, que han dado motivo a los espiritistas para afirmar la intervención de personas invisibles. Según ellos, los ángeles que hacen mover las mesas son espíritus desearnados y el papel del medio consistiría en comunicar los fluidos, en transmitir en otros términos, perceptibles los impulsos recibidos del más allá.



© Biblioteca Nacional de España

or Confucius, as easily as that of a defunct relative, and they are so simple as to imagine that these souls come at their call to converse with them. A person who is called a medium is the intermediary between the invoker and the soul invoked. The medium, under the influence of an unconscious and habitual hallucination, writes down on paper all the answers made by the spirit, or rather he writes down everything that comes into his own foolish head, imagining himself to be faithfully transmitting messages from the other world. The people who listen to him take these things, which are simply the thoughts of the ignorant medium, for revelations from beyond the tomb.

In spiritualism there exists only one true and rational idea; it is the possibility of man's placing himself in relation with the souls of the dead; but the coarse means resorted to by the partisans of this mystic doctrine, cause every enlightened and educated man to repudiate any fellowship with them. We merely mention spiritualism in this place as a vulgar and foolish phase of the popular belief in ghosts. It has higher pretensions, but science and reason alike forbid us to admit them". FIGUIER, Louis (1904). *The day after death. Our future life according to science*. London: McMillan & Co. Limited, p. 124.

autores, con muchos otros, había ahorrado tinta en rebatir las falsedades relacionadas con la evocación de los espíritus, en un trabajo necesario, decía Vicente Rubio, aunque a veces inútil por causa de una multitud siempre dispuesta a creer lo maravilloso.

Vicente Rubio veía más motivo para la sorpresa, por ejemplo, en los efectos que la habilidad de ciertos artistas itinerantes, como los prestidigitadores y ventrílocuos podían producir, incluso más increíbles que los propuestos por los espiritistas en sus mesas y sonidos del más allá. En su aplicación de la física y la química, los prestidigitadores *ligeros de manos* habían creado una *física recreativa* para funciones públicas llenas de misterio, ofreciendo un entretenimiento muy de moda durante todo el siglo XIX<sup>34</sup>.

Para finalizar, reproduzco lo que se dice que se escuchó en una de estas sesiones de *mesas giratorias*, donde parece que un espíritu sentenció: “podrán haberse burlado de las mesas giratorias; de lo que no se burlarán jamás, es de la filosofía que por su medio se ha difundido”<sup>35</sup>. Esto era rigurosamente cierto; hubiera o no comunicación real con los espíritus, la nueva filosofía tomaría un camino de expansión imparable. Significa que trabajos como el de Vicente Rubio, o los esfuerzos de la Iglesia Católica, no lograron frenar esta tendencia. Tal es así, que en 1855 se fundó la Sociedad Espiritista de Cádiz, primera de España, disuelta luego por la autoridad eclesiástica en 1857; y en 1861 se creó la segunda, esta vez en Sevilla<sup>36</sup>. Cada una de las disciplinas involucradas en la polémica, la científica, la teológica y la espiritista, se fue desarrollando independientemente y continuó cada una con las ocupaciones que se atribuían. Ninguna de ellas constituiría un enemigo letal para las otras, y pasada la disputa inicial, todas siguieron trabajando para, al fin y al cabo, dar respuesta a las preguntas sin fin que sobre su naturaleza y destino se plantea el inquieto género humano.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR MORELLÁ, Vicente (1997). “Carlos Lucia y Martínez. Una personalidad médica en el Segorbe del siglo XIX”. *Boletín de Investigación Fundación Bancaja*, nº 5. Julio 1997, pp. 65-68.
- ÁLVAREZ ESPINO, Romualdo (1878). *Real Academia Gaditana de Ciencias y Letras. Inauguración del año académico de 1878 a 1879*. Cádiz: Imp. de la Revista Médica, 1878.
- BECKENSTEINER, Christophe (1866). “Experimentos sobre las mesas giratorias”. Extracto de un artículo publicado en *L'Art Medical. El criterio médico*. Madrid, 25 de octubre de 1866, pp. 481-484.
- CANO PAVÓN, José Manuel (2000). “La Escuela Industrial de Comercio y Náutica de Cádiz”, *LLULL*, vol. 23, pp. 21-22.
- FIGUIER, Louis (1904). *The day after death. Our future life according to science*. London: McMillan & Co. Limited.

---

34. RUBIO Y DÍAZ, Vicente. Ob. cit., p. 38.

35. KARDEC, Allan. Ob. cit., p. 63.

36. GONZÁLEZ DE PABLO, Ángel. Sobre los inicios del espiritismo en España: la epidemia psíquica de las mesas giratorias de 1853 en la prensa médica. *Asclepio. Revista de Historia de la Medicina y de la Ciencia*. 2006, vol. LVIII, nº 2, julio-diciembre, p. 94. En general se trata de un completo trabajo sobre el fenómeno de las mesas giratorias y la evolución de sus explicaciones científicas a través de las revistas españolas especializadas en medicina.

- GONZÁLEZ DE PABLO, Ángel (2006). “Sobre los inicios del espiritismo en España: la epidemia psíquica de las mesas giratorias de 1853 en la prensa médica”. *Asclepio. Revista de Historia de la Medicina y de la Ciencia*. Vol. LVIII, nº 2, julio-diciembre.
- REGNAUD, Hipólito (1854). *Mancomunidad: vista sintética sobre la doctrina de Ch. Fourier* (con un folleto aparte titulado *Apéndice a la obra Mancomunidad, por los editores: Explicacion psicológica sobre las mesas parlantes; confirmación de la teoría cosmogónica de Carlos Feurier y su sistema de asociación, sacado por medio de dichas mesas*). Traducción de Israim. Cádiz: Imp. de la Revista Médica.
- RUBIO Y DÍAZ, Vicente (1860). *Estudios sobre la evocación de los espíritus, las revelaciones del otro mundo, las mesas giratorias y los trípodes y los palanganeros en sus relaciones con las ciencias de observación, la filosofía, la religión y el progreso social*. Cádiz: Imp. de la Revista Médica.
- TORRES SOLANOT, Vizconde de (1877). “Polémica a propósito del espiritismo”. *El Espiritismo*. Sevilla, 1 de marzo de 1877, p. 141-142.
- KARDEC, Allan (1868). “El espiritismo al alcance de todos: explicación dada por los espíritus, enseñanza y manifestaciones de los mismos”. *El criterio espiritista*. Madrid, 20 de diciembre de 1868, p. 53-63.
- (2011). (MARTÍNEZ, Gustavo N., Traducción). *El libro de los espíritus. Contiene los principios de la doctrina espírita acerca de la inmortalidad del alma, la naturaleza de los espíritus y sus relaciones con los hombres; las leyes morales, la vida presente, la vida futura y el porvenir de la humanidad según la enseñanza impartida por los espíritus superiores con la ayuda de diversos médiums*. Brasilia: Consejo Espírita Internacional.



## **LA REAL SOCIEDAD PATRIÓTICA DE SEVILLA Y EL LABORATORIO DE CHIMIA DE 1784**

*Conferencia pronunciada por el  
Ilmo. Sr. D. Manuel Castillo Martos,  
dentro del ciclo “Historia y Filosofía  
de la Ciencia y de la Técnica”,  
el día 25 de abril de 2022.*

### **INTRODUCCIÓN**

Uno de los grandes atractivos de la investigación es no quedarse en la mera relación de hechos y datos, un tipo de historia empírica contrario a lo que la Ilustración nos inculcó, que es la idea de la historia como un proceso lineal de acumulación progresiva, que la investigación historiográfica establece lo ocurrido a partir de hechos y datos, un trabajo que, como toda actividad científica, está constantemente sometido a revisiones críticas derivadas de la aparición de nuevos documentos o nuevas metodologías, que darán cabida a una serie de rasgos que humanizan a las personas que lo protagonizan.

Hay un hecho técnico a destacar: El ciclo conducente al racionalismo y la Ilustración no podría haberse dado sin el invento de la imprenta de tipos móviles.

«En la actualidad nuestra pesadilla posmoderna consiste en una aldea global hipercomunicada, donde la estupidez humana nunca había sido tan visible y rentable como ahora. Frente a los legisladores racionalistas, que fueron los ilustrados europeos de la época, surgen voces opuestas que llegan hasta nuestro presente, y explican varias de las miserias que nos agobian. El repudio a los valores del racionalismo, la tolerancia y el empirismo encarna unos principios que están en las antípodas de la Ilustración. Y acaba por desviar las humanidades de su objetivo más genuino, que es la investigación crítica de los valores, la historia y la libertad, derivando hacia un conjunto de despreocupadas especialidades la mayoría de ellas basadas en la identidad» [Villanueva, (2021)].

### **CONTEXTUALIZACIÓN DE ACTIVIDADES EN SEVILLA EN EL S. XVIII**

#### ***Influencia de la Ilustración***

El siglo XVIII es apasionante desde el punto de vista social, político y literario, hay una conjunción de fuerzas intelectuales de creencias y situaciones riquísimas. La expre-

sión feliz que caracteriza al siglo XVIII, *Siglo de las Luces*, fue puesta en circulación en 1782, poco antes de la Revolución francesa, por el fisiócrata Pierre-Paul Lemercier de la Rivière, y la mejor síntesis iconográfica de lo que aquel momento crucial en la historia de la humanidad representó, está en el grabado que hace de frontispicio diseñado por Charles Cochin en el primer tomo de la *Encyclopédie*, anunciada como un *Diccionario razonado de las ciencias, las artes y los oficios* por los directores Denis Diderot y Jean le Rond d'Alembert cuando se empezó a publicar en 1751. Vemos allí representada alegóricamente la Verdad iluminada en su templo por la luz del Saber, sustentada por la Razón, la Filosofía y enriquecida por los frutos que todas las ciencias le ofrecen.

En un proceso que arranca con la Ilustración en Europa, para estar presente en el ámbito de experiencia de la vida de seres humanos, situó progresivamente la mirada en el humanismo renacentista, en un mundo universalmente educado en el racionalismo laicista con una fructífera herencia hasta hoy. La razón pensante tiene superioridad frente a la mera emoción y la voluntad. Lo ilustrados habían sometido a un severo escrutinio el terreno de la religión, completando una tarea del humanocentrismo del Renacimiento que ha marcado nuestra civilización.

Se pretendía un progreso intelectual sin solución de continuidad, alimentado por un pensamiento recio de impronta humanista y racionalista. Immanuel Kant (1724-1804), es la gran figura que representa lo mejor del pensamiento ilustrado, abogó por lograr una comprensión racional de todo lo que nos rodea, a lo que contribuyeron las mentes más preclaras de Europa. En España, la censura que hacía la Iglesia a través de la Inquisición, reprimió el pensamiento ilustrado, no obstante, veremos cómo la Sociedad Patriótica de Sevilla proyectaba hacer ciencia sin olvidarse de la historia de formación de las ideas.

## **ADVERSIDADES EN LA SEVILLA DEL XVIII**

### ***Las inundaciones por crecida del río***

El Guadalquivir se desbordaba con frecuencia inundando a la ciudad. Durante el siglo XVIII lo hizo en diversas ocasiones, especialmente en 1708, 1736, 1739, 1740, 1751, 1758, 1777 y 1784. Retengamos este año en el que la Sociedad Patriótica de Sevilla realiza el Proyecto de un laboratorio de Química. En esta última ocasión, la fuerza del río rompió el puente de barcas y el agua subió en algunos lugares hasta más de tres metros de altura, inundando por completo el monasterio de la Cartuja y anegando una parte importante de los edificios y calles de la ciudad. Con motivo de esta grave avenida, se construyeron a orillas del río dos robustos malecones de contención desde el llamado Almacén del Rey hasta la Torre del Oro, lo que conllevó la ordenación y la urbanización de la ribera, organizada desde entonces en niveles aptos para el paseo y la circulación de coches y carruajes.



### ***Traslado de la Casa de la Contratación a Cádiz***

La pérdida del monopolio americano representó, sin duda, un duro revés para Sevilla, no obstante, la ciudad no perdió por completo sus vínculos con América, no quedó descolgada de la Carrera de Indias, ni el río Guadalquivir reducido a una vía muerta para el comercio. Sevilla mantuvo una apreciable actividad comercial a lo largo del siglo XVIII, que no excluyó una participación en el comercio con los virreinos americanos, como lo demuestra la amplia nómina de cargadores, comerciantes al por mayor y cosecheros de India.

Sevilla siguió siendo importante como plaza financiera de la Carrera de Indias, a través de los contratos de préstamo a riesgo marítimo, cuyo valor total se aproximó a los ochocientos mil pesos solo en el período 1785-1799.

Los decretos de libre comercio reactivaron el interés por el comercio americano y las expectativas abiertas en este sentido aumentaron en 1784 con la creación de un Consulado nuevo. El Consulado era un organismo encargado de proteger la actividad comercial y dirimir los pleitos entre los comerciantes, tenían ya una larga tradición en la Corona de Castilla, Burgos, Bilbao, y más en Sevilla para el tráfico americano bajo su versión de Universidad de Cargadores a Indias. Como se sabe, la importancia de este organismo se debe a que ejercía un fuerte poder en todos los sentidos, y en muchas ocasiones era la única fuente de recursos con que contó la Corona para hacer frente a sus muchos problemas. La situación de Sevilla era inmejorable para ejercer una férrea supervisión del comercio, pero derivó en un fraude institucionalizado y en un desplazamiento del control por parte de la Casa de la Contratación hacia el propio Consulado, y hombres del comercio sevillano intervinieron en todos los ámbitos mercantiles.

La crisis finisecular se encargaría de frustrar estas expectativas, abocando a la ciudad a nuevas contrariedades en el ya difícil tránsito del Antiguo al Nuevo Régimen.

«Es aconsejable matizar el cuadro, quizás excesivamente recargado de tintes sombríos, que a menudo se ha trazado sobre la historia de Sevilla después de la pérdida del monopolio del comercio americano. Mal que bien, la ciudad resistió, se reinventó a sí misma y fue sede de notorias instituciones. No faltó el brillante escenario urbano de múltiples fastos y celebraciones que alimentaban el imaginario histórico sobre la época. Finalizando el reinado de Carlos III, en 1788 se inauguró el cuartel de Caballería en la Puerta de la Carne y el traslado de las estatuas romanas de Itálica a los Reales Alcázares» [Iglesias Rodríguez, (2018)].

### ***FUNDACIÓN DE SOCIEDADES DE CIENCIA, MEDICINA Y LETRAS***

Del racionalismo ilustrado y de los fundamentos de la civilización promovida sobre la base de las ideas de la Ilustración surge la fundación de Academias. Entre el último tercio del siglo XVII y la mitad del siglo siguiente se crearon en Sevilla cinco organismos extrauniversitarios muy diferentes entre sí e importantes en la difusión de la ciencia moderna en la ciudad y en Andalucía. Por orden cronológico de fundación tenemos al

*Real Colegio Seminario de San Telmo* en 1681, la *Regia Sociedad de Medicina* en 1700 y la *Real Academia Sevillana de Buenas Letras* en 1751, esta se funda treinta ocho años después que lo hiciera la *Real Academia Española* (RAE), que se inspira para ello en la *Académie française* fundada por el cardenal Richelieu en 1635, cuya Acta fundacional fue suscrita el 3 de agosto de 1713 [Villanueva, 2021].

En un inciso diré que, es digno de destacar, la edición de *El Quijote* que la RAE hizo en 1780, prologada por Gregorio Mayans, y fue muy elogiada en su tiempo; incitada por la cuidada edición inglesa de Tonson en 1738.

A estas academias le siguió la que ahora nos ocupa, la *Sociedad Patriótica de Sevilla*, en 1775. Y en 1793 la *Academia particular de Letras humanas de Sevilla* que tuvo una vida efímera, hasta 1799.

El ambiente cultural en la Sevilla de la época era propicio para fundar una Sociedad Patriótica tal y como aconsejaba el libro *Discurso sobre el fomento de la industria popular* de Pedro Rodríguez Campomanes en 1774. Y el Asistente Pablo de Olavide, consiguió que el Real Consejo de Castilla autorizara en 1775 la creación de una Sociedad semejante a la existente en el País Vasco, *Real Sociedad Bascongada de Amigos del País*.

La primera denominación fue la de *Sociedad Patriótica Sevillana*. El nombre de *Patriótica* era el común en los orígenes de las Sociedades Económicas españolas, y la de Sevilla solía utilizar este apelativo simultaneándolo con el de Económica, que era el que la administración empleaba en sus normativas. A partir de la Guerra de la Independencia ya no fue frecuente utilizar el primer título, denominándose ya siempre *Sociedad Económica de Amigos del País de Sevilla*.

Sus objetivos se centraron en el desarrollo de la agricultura, la industria, el comercio y los oficios mediante enseñanzas prácticas, en Sevilla y su provincia. Pablo de Olavide contó con la colaboración de Martín de Ulloa (hermano de Antonio de Ulloa), del Conde del Águila y otros coetáneos ilustres. El 15 de abril de 1775 el Ayuntamiento determinó que se formara la Sociedad con 40 de socios iniciales, fundándose así la *Sociedad Patriótica Sevillana* el 25 de mayo. Los estatutos de la sociedad fueron aprobados por Real Provisión el 16 de diciembre de 1777, y sus miembros, en un principio, se reunían en los Reales Alcázares.

Pudiera ser que la *Sociedad Patriótica Sevillana* se inspirara para la creación del proyecto de una Academia y laboratorio para la enseñanza de Química, en la Academia de Enseñanza de Minas de Almadén, primer centro de estudios superiores del país, fundada ese año de 1777 por una Real Orden de Carlos III con fecha 14 de julio que disponía su obligación a *enseñar a los jóvenes matemáticos, que se remitirán a estos Reynos, y los de América, para que se instruyan en la theórica y prácticamente, la geometría subterránea y mineralógica*. La primera sede Academia fue provisional, sirviéndose del alquiler de edificios preexistentes poco adecuados, hasta que otra Real Orden de 1781 disponía la construcción de un inmueble apropiado, inaugurado a fines de 1785 [VV. AA. (2003):30-31]

En el siglo XVIII había en Sevilla grandes masas populares sin acceso a una ordenada y gradual enseñanza pública. El nivel primario se encontraba en un deficiente estado,

aunque había varias escuelas de primeras letras en diversas zonas de la ciudad, y los mejores resultados se conseguían en la instalada cerca de la iglesia de Santa María la Blanca. De aquí que la preocupación más importante de la *Sociedad Patriótica*, fuera mejorar la enseñanza pública.

Por otra parte, para paliar el lastimoso estado de la enseñanza científica en Sevilla, dicha *Sociedad Patriótica* decidió a finales de 1778 crear una cátedra de Matemáticas a sus expensas, y en julio de 1780 contrató al profesor francés de Matemáticas Pierre Henry para que impartiera docencia, con un salario no menor de veinte libras anuales. Para ello la *Sociedad* solicitó a Carlos III que la cátedra se financiara con las rentas del ex colegio jesuita de San Hermenegildo, y adjuntaba los informes de Martín de Ulloa y Bernabé Portillo acerca de los hitos matemáticos relacionados con Sevilla. A la vez Martín de Ulloa regaló cinco mapas del mundo y redactó una Instrucción para las clases de Matemáticas.

La *Sociedad* sufrió numerosos ataques, en especial de los sectores conservadores, que no veían con buenos ojos sus actividades. Como consecuencia de los más duros sentimientos contra los ilustrados franceses de la sociedad española, en 1790 fue detenido el profesor Henry, y encarcelado, sin fundamento legal, durante dos años en un calabozo húmedo, lo que parece que contribuyó a su fallecimiento acaecido quince días después de su liberación. Tuvo un único alivio en su desgracia: aunque con bastante dificultad pudo escribir un *Tratado de Mecánica*. De esta infame manera murió el primer hombre que hizo revivir las Matemáticas en el Sur de España. Le sucedió Sebastián Morera.

Los sucesos posteriores contribuyeron a que la actividad de la *Sociedad Patriótica* fuera más escasa de lo que habían propuesto sus fundadores. No obstante, su labor docente se manifestó en otras actividades, verbigracia, un establecimiento para la enseñanza de Taquígrafía, Francés, Música y Geografía; así como diversas escuelas de hilados, estas últimas no solo en Sevilla, sino en otras localidades de Andalucía Occidental, Ayamonte, Bonares, Sanlúcar de Barrameda, Arcos de la Frontera, entre otras. [Calderón España, M.C. (1991). Cano Pavón, J.M. ((1993) y 1996). Domínguez Ortiz, A. y Aguilár Piñal, F. (1976): 250-251. Durán Guardado, A. y Curbera Costello, G. (2005): 91].

## **ENSAYO DE UN LABORATORIO DE CHIMIA**

Expreso a Antonio Valiente Romero mi agradecimiento por haber puesto a mi disposición el Legajo nº 53 completo del Archivo de la Sociedad Económicas del País de Sevilla, que trata del *ENSAYO DE UN LABORATORIO DE CHIMIA*, que paso sin demora a comentar.

Uno de los esfuerzos más notables de la Sociedad Patriótica de Sevilla fue la creación de un laboratorio de Química en 1784, descrito en el Legajo citado con el título «*Descripción de varios documentos presentados a la Sociedad patriótica de Sevilla, sobre la confección de un obrador de Química que pretende establecer esta Academia en Sevilla, por un alumno del mismo ensayo, año 1784*». Este obrador o laboratorio será el primero construido por una Sociedad Patriótica en España, parafraseando el lenguaje

de la época decimos que sus fundadores influidos por la Ilustración, creían que su deber era hacerlo para la felicidad de sus conciudadanos.

Y entre los objetivos más nobles que perseguía esta creación, estaba también el de cultivar la solidaridad humana, en la que insiste August Comte (1798-1857) cuando sentenció con su propuesta la superación definitiva del «estado teológico» de la humanidad para llegar al «estado científico y positivo». Siempre con los pies clavados en el territorio firme de la razón y la mirada puesta en el desarrollo ilimitado de la ciencia y de la propia sociedad. Años más tarde escribió: *El deber y la felicidad consisten igualmente en vivir para los demás*. Y la felicidad de vivir para los demás recorre los surcos literarios que describen la alegría que genera humanizar a la humanidad: Goethe en *Los años de aprendizaje de Wilhelm Meister*, Tolstói en *Guerra y paz*, y Albert Einstein en una declaración epigramática publicada en *The New York Time*, escribió *Sólo una vida vivida para los demás es una vida que merece ser vivida*.

### **DESCRIPCIÓN DE LA CASA ACADEMIA CON LABORATORIO Y ESCUELA**

Para culminar este proyecto se necesitaba adquirir una casa espaciosa, clara, bien distribuida, y en sitio céntrico para comodidad de los concurrentes, y con buena provisión de agua, que estaba asegurada por disponer la ciudad de acueductos y cañerías que abastecían al vecindario. Como su uso era absolutamente necesario se debería tener varias pilas distribuidas en sus diferentes salas.

Esta *Sociedad* subsistía económicamente solo con la cuota que pagaban los individuos que la componían, por lo que propusieron que, si no podían adquirir una casa en propiedad, al menos había que tener seguridad de ocuparla en usufructo.

La distribución de espacios era la siguiente:

- Sala principal, aislada de ruido, donde puedan sentarse el director y los consejeros con decencia y comodidad, a la cual se le dará el carácter y lugar de Academia.
- Sala destinada a Escuela, donde el Catedrático, Maestro o un discípulo adelantado impartirá conferencias y lecciones de los principios de la Química y los objetivos a conseguir con ellos.
- Sala destinada a laboratorio, situada en el interior, de estructura cuadrada y mayor que las anteriores, tendría un horno con chimenea, construido de forma circular, hexagonal u octogonal, proveído de hornilla para las operaciones que lo necesite.
- Un despacho o Botica próximo a la calle, en el que se venderán al público, a precio equitativo, los compuestos y preparados químicos, la mayoría con propiedades medicinales.

También debe haber sala para las drogas (sustancias químicas), sala de experiencias con instrumentos, sala para biblioteca y sala para gabinete. En caso que la capacidad de

la casa no lo permita podrá ceñirse estas cuatro en una sola sala, debidamente separadas.

Se dispondrá también de viviendas para los maestros y domésticos que precisen residir en dicha casa. Si no hubiera espacio, residirían en casas cercanas.

Sería conveniente tener un jardín o huerto, donde cultivar plantas de utilidad en Química.

En el dintel de la entrada se colocará un festón con algún dibujo de proporcionada magnitud, que bien pudiera ser una inscripción como la que tiene Bolonia por divisa, *Alma Mater, per Chimica docet*.

El acceso al edificio será a través de un zaguán y patio de extremada limpieza, para así indicar el buen cuidado y orden de la casa. Se adornarán los corredores con figuras alusivas a la Química, y habrá algunos bancos para sentarse. Y se colocará un reloj de caja.

### **LA ESCUELA. AULAS**

El aula estará en la planta baja, próxima a la entrada, aunque no cerca de la calle, para evitar entradas y salidas de personas ociosas y curiosas. Ocupará una sala amplia, con claridad, estará aseada y adecuada para la enseñanza de la teoría y los primeros conocimientos de Química,

Habrán mesas con tintero y pluma, y asientos para los alumnos, estantes y alacenas para libros, sustancias químicas, vasijas y los instrumentos para practicar los primeros rudimentos de esta ciencia.

La enseñanza será impartida con los métodos modernos, utilizando libros de diversos autores. La enseñanza se hará atendiendo a las circunstancias particulares y al diferente modo de entender cada uno de los alumnos.

Se propondrá varios métodos: ALFABÉTICO, siguiendo el orden que aparece en los diccionarios. CRONOLÓGICO para referir historias que estén en los anales, y diarios. El ELEMENTAL O GEOMÉTRICO es el más apropiado para dictar las lecciones de Matemática. AFORÍSTICO, cuando dice que es para entender en libertad las máximas. Se sabe que este método interviene a través de la interpretación en la experiencia estética entre el ser y el mundo, y es utilizado especialmente en el ámbito filosófico o hermenéutico.

Aunque el conocimiento de Historia Natural es necesario para la formación del químico, el primer estudio debe ser las sustancias químicas, especialmente las relacionadas con la metalurgia y las artes fabriles, por cuya razón se procurará tener colocadas en la Biblioteca y en el Gabinete los mejores escritos y obras que tratan de esas materias, y, si fuera posible se tendrán en propiedad. Algunos fragmentos materiales de las sustancias más comunes estarán ordenados a la vista, para que los alumnos puedan conocerlos y aprender su verdadero uso.

Como la mayoría de las obras de Química están escritas en latín o en francés y en muy escaso número en castellano, los alumnos y el maestro deben saber leer la lengua francesa, y entre tanto que no la posean, la Sociedad podrá hacerse cargo de la traducción

e impresión de los textos más oportunos, lo que redundará en beneficio de las lecciones impartidas.

Convengo en referir que se nombra lengua castellana, porque así se denominaba en los diccionarios y ortografías, y es a partir de 1913 cuando apareció en sus títulos lengua española [Villanueva, 2021].

Igualmente se deberá aprender el buen uso de los instrumentos relativos a las operaciones de la Química, y si no fuera posible tenerlos en el aula, por su dificultad o por quebrarse fácilmente, se colocarán en el laboratorio propio de la Escuela, y en sus paredes se pondrán dibujos y cuadros con los que se suelen practicar las operaciones más frecuentes. Igualmente, habrá tablas con la nomenclatura, carácter, afinidad y otras propiedades instructivas de las principales operaciones.

Las lecciones se impartirán con explicación de la teoría acompañada de experimentos, para lo que se dispondrá una mesa con instrumentos y sustancias sólidas y líquidas. Entre los diferentes experimentos será conveniente practicar alguna que otra vez en dicha aula, para atractivo y diversión de los alumnos, combinaciones de ingredientes de los que resultan efectos que causan sorpresa y admiración, verbigracia, mutación de colores, inflamación espontánea, trasmutación aparente de los cuerpos metálicos, etc. Porque la agradable sorpresa que ocasionan puede estimular a los jóvenes a interesarse por la Química.

## ***EL LABORATORIO***

En el laboratorio son imprescindibles DIRECTOR, CATEDRÁTICO, MANIPULADOR, SIRVIENTE, BOTICARIO y ASENTISTA.

Para el cargo de DIRECTOR debe ser preferido un español a un extranjero, el cargo será vitalicio y estará bien dotado, con una asignación regular. Se examinará la suficiencia de los pretendientes con algún escrito que éste haya producido. La Sociedad obtendrá un Informe secreto de su vida y costumbres para cerciorarse que tiene una moral recomendable.

El CATEDRÁTICO ha de tener amor al estudio, que sea locuaz sin presunción, ni arrogancia. Que haya estudiado en Universidades y Colegios y observado una buena conducta. Será conveniente que sea médico relacionado con la Química. Impartirá sus clases a las horas más oportunas, y tendrá libre el resto del día para perfeccionar el método de enseñanza, cuidar el aseo del aula, impedir las disensiones entre los discípulos, ocupar tiempo en traducir al castellano algunos Tratados u Opúsculos latinos o franceses de utilidad. Lo más importante es que preste atención a la literatura francesa sobre la química farmacéutica.

El MANIPULADOR trabajará en la Química práctica, cuidará de la limpieza, arreglo, orden de muebles e instrumentos. Se contratará alguna vez un manipulador transeúnte, para practicar operaciones extraordinarias.

El SIRVIENTE tendrá como principal ocupación la portería, limpiar la entrada, zaguán y corredores, ayudar al Manipulador cuando este lo solicite, tener agua corriente

en la casa, cuidar el jardín con la poda y el riego, y precaver los arreglos que necesite la Casa. La persona más apropiada es un Sargento o Cabo de tropa retirado, aunque sea de edad madura debe saber obedecer. Se le dará vivienda en la Casa y los emolumentos a percibir serán los que les pueda convenir como disfrute por su retiro.

El DIRECTOR DE OFICINA O BOTICARIO regentará la Botica, debe ser un profesor que haya adquirido un conocimiento sublime y un gusto decidido por la continua lectura de los mejores libros de Botánica, Mineralogía, Metalurgia, Materia médica, Zoología, Fósiles, sustancias químicas. Contará con uno o dos ayudantes para realizar las operaciones en el laboratorio.

El ASENTISTA debe estar instruido en Ciencia y Economía, conocer los instrumentos y muebles necesarios que deba haber en un laboratorio. Entre sus obligaciones, está contribuir con diligencia a la adquisición de muebles, llevar cuenta exacta y al día de la distribución de los gastos.

### **SALA DE INSTRUMENTOS**

Los instrumentos se colocarán en una sala cuadrada de la planta baja de suficiente extensión, con puerta principal y en uno de sus lados tendrá salida a un patio espacioso, donde habrá un recipiente donde se depositen los residuos sólidos inservibles, y un sumidero o caño para verter en él los líquidos inútiles.

Habrán mostradores para poner encima aros de toneles a manera de holleros, retortas y matraces, que en su momento se pondrán en los hornos. Engrudos para enlodar las juntas de los vasos antes de ponerlos el fuego, según era frecuente desde la Química antigua.

El laboratorio tiene que tener una chimenea erigida en medio o en los lados de la sala, con una campana espaciosa bajo la que se pueda trabajar sobre hornillas. Sobre ella habrá un conducto de altura y anchura suficiente para que extraiga fácilmente humo y vapores perniciosos. También se construirán hornos grandes y pequeños, fijos y portátiles, cuadrados y redondos, para utilizarlos adecuadamente en las operaciones. Estos hornos sustituirán a los empleados por los alquimistas en diferentes tiempos, como son, entre otros: Tribikos de María la Judía, o su baño. Horno Piger Henricus, o Atanor

Para otras operaciones se necesitará disponer de varios almireces de distintos tamaños para pulverizaciones manuales, y morteros de diversas magnitudes. Una loza de pórfido montada sobre una mesa rígida para lixiviar (separar con disolvente adecuado las partes solubles de las insolubles). Una prensa vertical, para extraer aceites, zumos y féculas, se colocará, a ser posible, en un corredor próximo, y se tendrá cerca una tahona de mano para quebrantar o reducir a harina las materias oleosas que resulten y que no sean fáciles de reducir a polvo en los almireces. Una estufa puede ser portátil, pero es preferible tenerla en un lugar fijo y separado, para desecar sustancias propensas a pudrirse o a descomponerse en lugares húmedos.

Convendrá tener en un sitio aparte un alambique de cobre, y de otros materiales para destilaciones. También alambiques portátiles.

Utensilios de hierro y lata: sartenes, conos para vaciar las materias metálicas fundidas, parrillas, moldes, embudos y botes.

De barro y vidriado: tinajas, sangraderas, lebrillos, fuentes, jarros, vasijas destinadas para el fuego, como ollas, copelas y crisoles.

De vidrio: alambiques, embudos y morteros, retortas, matraces, recipientes, campanas y vasos para evaporación.

De madera: mantenedores para sostener coladores, mangas y recipientes.

Algunas barras y cubetas de anillos grandes y pequeños, como también algunos tamicos y cedazos de mano preparados con tela más o menos tupida.

Otros instrumentos son los de Física inventados estos últimos tiempos por los filósofos más sabios y puestos en uso modernamente en las principales Academias, para hacer con ellos los exámenes más sublimes, y evitar error e imperfección. Aunque estos instrumentos son muchos y algunos tan voluminosos y complicados que con dificultad podrá dárselos cabida en el obrador más espacioso, como son las diversas máquinas neumática, eléctrica e hidráulica, molino de Langelote, olla de Papin, lámpara del esmaltador, espejo ustorio, balanza hidrostática, aparatos para la experiencia del aire fijo, y otros preciosos semejantes. Solo debería destinarse para dicho obrador, termómetros para examinar el calor o graduar el fuego de las operaciones, reglas graduadas para medir la consumación de los cocimientos, bombas, sifones, balanzas y pesos, medidas, piedras de toque, lentes, fuelles de boca, tubos capilares, barras imantadas, etc.

Con estos instrumentos se podía hacer examen de cualquier oficio, manipular y exponer en ejecución todas las ciencias y artes, medidas y proporciones para practicar ensayos de Agricultura, Medicina, Farmacia, Pintura, Tintes, Alfares, Platería, Fundición, Esmaltado, para preparar hierro, vidrio, latón, cobre y quinquillería, trabajar azúcar y condimentos de confitería y cocina, preparar bebidas, vinos, y licores, helados o calientes, etc.

Son muchos los oficios que están relacionados con la Química, y no parece posible la colocación de todos los instrumentos de cada uno. Los más utilizados para los oficios relacionados directamente con la Química son los instrumentos más peculiares de la Química como Molino de Langelote, lámpara del esmaltador y la de Cardano, olla de Papin, diversas bombas de atracción y de compresión, prensas portátiles, estufas, fuelles, calentadores, atahona de mano, mangas hipocráticas, filtros de clases diferentes, y otros utensilios de esta naturaleza.

Otros instrumentos manuales: tubos capilares, sifones y jeringas, eslabones y diamantes montados, piedras de toque, imanes de artificio, y otros muchos de pruebas. No deben faltar los instrumentos matemáticos que puedan ser útiles a la Química: diversas reglas, escuadras, pies de rey, niveles, pantómetros, semicírculos. Asimismo, será importante disponer de instrumentos pertenecientes a la estática, mecánica, música, astronomía, gnomónica.

Se tendrán también microscopios, telescopios, polemoscopio, poliedros, lentes, prismas, acromáticos, espejos parabólicos y comunes. Instrumentos más generales pertenecientes a la electricidad: conductores, tubos, barras, cadenas, globos, alambres, copas, cubiletes, columpios, y otros precisos para las maniobras de la electricidad resinosa o vítrea.



La misma prevención debe hacerse con pinzas, agujas, buriles, cinceles, brochas, espátulas, cucharas, etc. necesarios para diferentes máquinas para pneumetría, hidráulica y pírca.

No se debe obviar los instrumentos para preparar bebidas y licores gratos al paladar por medio de la música. Entre los físicos que más han trabajado sobre dicha invención, sobresale la Clave ocular del P. Castel, en el que hay correspondencia entre nuestros órganos que perciben los colores junto a los sonidos. Un químico anónimo ha manifestado que dicha correspondencia lo relaciona con el órgano del gusto, lo que ha permitido establecer un sistema músico de sabores con experimentos extraordinarios.

Otros instrumentos nobles que deben colocarse en un laboratorio, son los de Física puestos en uso modernamente en las principales Academias, para hacer examinar y evitar errores e imperfecciones. Algunos de estos numerosos instrumentos son voluminosos y hay dificultad para tenerlos en el laboratorio, tales como máquinas pneumática, eléctrica e hidráulica, molino de Langeloso, olla de Papin, lámpara del esmaltador, espejo ustorio, balanza hidrostática, aparatos para la experiencia del aire fijo, y otros semejantes. Solo deberían estar en el laboratorio, termómetros para examinar el calor o graduar el fuego de las operaciones, reglas graduadas para medir la consumación de los cocimientos, bombas, sifones, balanzas y pesos, medidas, piedras de toque, lentes, fuelles de boca, tubos capilares, barras imantadas, etc.

En casi todos los tratados antiguos de Química hay artículos destinados para tratarlos, entre los engrudos sobre sale a los demás uno que por componerse de ingredientes más viscosos se halla caracterizado con el enfático nombre de Jutuz Sapientie, pero los químicos modernos cerciorados por experiencias que el agua, o cualquier líquido semejante, puesto al fuego se enrarece hasta ocupar trece mil espacios de su volumen, cuya expansión no puede haber vaso que la tolere, lejos de enlodar con algunos engrudos dichos vasos, se han propuesto hacerlos a los mismos respiraderos, para no alterar las operaciones.

Además de los instrumentos mencionados, es preciso describir otros relacionados, por ejemplo, además de morteros y almireces de piedra y bronce, los hay de hierro, vidrio, palo, hueso o marfil, con sus mangos correspondientes, usados para reducir a polvos sutiles sales y sustancias mercuriales nocivas, las cuales no podrían ser apropiadas en vasos de metal, sin haber un inquinamiento o una propiedad corrosiva, la cual precaverse. Por la misma razón se debe tener una precaución semejante para embudos y casetas, espátulas, cucharas y otros utensilios que es necesario tenerlos de diferentes materias, por servir muchas veces a iguales usos, o tener contacto con semejantes operaciones.

Hay instrumentos comunes pertenecientes a varios usos, que no pertenecen a una clase particular de las referidas, sino a muchas de ellas, y viene así un cúmulo de instrumentos pequeños o manuales de metal o madera, que sirven para el manejo común de las operaciones, como son tenazas, tijeras, paletas, fuelles, pinzas, agujas, hilo, naípe, papel, conchas, vejigas, cortaduras, etc. Unos sirven para manejar y avivar el fuego, otros para mover o acelerar el curso de las operaciones, otros para cerrar los vasos, y otros para colocarlos sobre cojines o asientos de materia mullida. Asimismo, se necesita

una pila o fregadero con caño corriente de agua, para limpiar bien y con prontitud las vasijas que tengan adheridas alguna materia que haya que eliminar.

Los inventados para las artes liberales y mecánicas que tienen sus respectivos instrumentos útiles, recomendables y convenientes. La muy copiosa colección de instrumentos inventados en estos últimos tiempos para las ciencias físicomatemáticas. Pudiendo recurrir los que se interesen por ellos a los escritos físicomatemáticos de Ozanan, Acase Hembroc, Desagriliens, Boyle, Wolfio, Nollet y Sgravesande, y a los autores que particularmente han descrito dichos instrumentos, Leopoldo Belidor, Zonca, Bion, Rameli, entre otros.

Hay instrumentos que por su tamaño serían asequible a la sala, pero al tener un costo considerable u otros inconvenientes, hay que exceptuarlos. Por ejemplo, los pertenecientes a gabinetes de espejos, ecos de artificio, fuentes de rarefacción y comprensión, instrumentos armónicos o relativos a la acústica y óptica, como la estatua de Atenon, celosía prismática, tuba estentoria de los oráculos antiguos, oreja portátil de Dionisio el tirano. Los autómatas o máquinas móviles por sí mismas; de estos últimos tipos, no menos ingeniosos, son esferas móviles, planetarios o maquinas astronómicas, relojes extraordinarios de sol, y de campana, en los que se comprenden los cuadrantes o rodajes artificiosos, que por su nombre o movimiento manifiestan los cálculos y revoluciones celestes, los aspectos de los planetas, el tiempo y duración de los eclipses, y otras maravillosas máquinas de astronomía y gnomónica, Estos instrumentos o ingenios, de tanta singularidad y excesivo costo, deben colocarse en los gabinetes de alhajas y rarezas, mejor que en uno de Chimia.

Es muy necesario disponer de adminículos para encender el fuego. Para cuyo fin será conveniente tener junto a los hornos provisiones de céspedes y turbas, y otras materias de fácil combustión, para poder por su contacto encender con la mayor facilidad el carbón de los hornos o los anafes, cuyo pábulo deberá ser el único en las operaciones para mantener los vasos exentos de tiñe o de hollín.

Se hace también preciso disponer de un surtido de vasos para el uso de las operaciones que los necesite. Por dicha razón es preciso tener en un sitio no muy distante del obrador un acopio de muchos vasos de barro y vidrio, que se rompen con facilidad al fuego, como son alambiques, matraces y crisoles, etc. y también muchas vasijas de vidrio o cristal.

Pueden tener también lugar en sala contigua un pequeño almacén, con filtros, lengüetas, coladores, algunos aceites y vinagre, lejías, sales, orines y cenizas, barrilla, arena, tierras de bolares o gredosas, yeso, cal apagada, y materias para formar los hornos, cuyas especies según su línea, podrán colocarse separadas entre sí en tinajas o cajones levantados del suelo, o en estantes y alacenas conformadas de antemano en la misma pieza. También se podrá tener una carbonera, para contener carbón, cisco, que por ennegrecer o ensuciar, deberá estar en sitio separado, con la precaución de preservarlas del fuego, y se asignará un lugar oportuno para echar la ceniza.

Siendo también el obrador destinado para el adelantamiento de todos los oficios, o debiendo este considerarse como una oficina universal en la cual puedan todas las artes practicar sus respectivos ensayos, operaciones y maniobras, para perfeccionarse cada

uno en su ministerio, es preciso que haya los instrumentos relativos a cada profesión, así en cajones debidamente ordenados el platero tendrá buñidores y buriles, el dorador sus aparatos, el herrero sus limas, el lapidero su cinceles, y del mismo modo las otras herramientas pertenecientes a los demás oficios.

Comoquiera que un obrador de Química, tal como lo intentamos establecer, no es solo para trabajar, ni para ejercer en él operaciones venales, sino para manipular en él otras miras o investigaciones más útiles, entre otras, examinar por su medio la legitimidad de las sustancias, decidir la esencia o calidad de cualquier ente, sacar en limpio la verdad de una duda, quitar o disipar preocupaciones establecidas, ejercitar la diversión o la curiosidad con juegos útiles, y combinación maravillosa, dividir o clasificar las producciones convenientes, establecer el constitutivo de las sustancias, examinando sus propiedades y virtudes, exponer la noticia y progreso de los trabajos útiles, averiguar secretos, instruir las artes, aumentar el comercio, precaver los daños, los dolos o los adulterios de la materia, examinar los quilates o grados de pureza de las sustancias e investigar, en fin, los medios de economizar los trabajos y costos de las operaciones.

## **LA ACADEMIA**

Se necesitaba para establecer este proyecto de Química no solo la Escuela y el laboratorio, también una Academia donde se enseñen, practiquen y perfeccionen los conocimientos de Química. En la Academia es donde debe residir el gobierno de la casa, la dirección de las fábricas y los oficios que se adelanten o se restablezcan de nuevo por su orden en la ciudad.

Ocupará la Academia la mejor sala equipada con asientos, mesas, bancas y escribanía. El principal adorno será una imagen o retrato del rey colocada en el testero principal, bajo cuyos auspicios se espera tener a esta Institución. Las ventanas dan luz a la sala, y tiene vidrios esmaltados y coloridos que sirven de adorno, y de un material que impide ver desde el exterior lo que sucede en su interior. En las paredes centrales se pondrán infografía o lienzos alusivos a su Instituto, y en los testeros laterales se colgarán mapas o infografías de colores hechos a pluma, en los que se mostrarán las minas, las tierras, las piedras, los metales y minerales más útiles de la Península, que servirán de instrucción y de adorno. Entre estos mapas se colocarán retratos de los químicos más famosos de todos los tiempos, dando prioridad a Becher, Sthal, Helmont, Paracelso, Cardano, Cornelio Agripa, von Born, acompañados de una breve descripción de su vida. También los retratos de los más célebres alquimistas, por ejemplo, Sendibogios y Raimundos, entre otros muchos.

Se creía conveniente que el PRESIDENTE fuera uno de los togados de la Audiencia, o alguna persona docta e ilustre de la ciudad, quien tendría también el carácter de juez conservador. Los cargos de SECRETARIO, TESORERO, FISCAL Y CANCELLER recaerían en personas destacadas en saberes y oficios, y celebrarían Juntas para tratar lo que debía practicarse o suprimirse en el laboratorio, cómo adquirir productos naturales de la provincia, emprender alguna operación particular motivada por el establecimiento

de nueva fábrica, o para perfeccionar algún oficio, arreglar una máquina, imitar alhaja y piezas de estaño, hierro y vidrio de poco valor. Para realizar estos trabajos, se debía disponer de un surtido de instrumentos y sustancias que veremos enseguida.

Cuando se celebren en la Academia Asambleas o Juntas debe haber suficientes asientos reservados para los académicos y otros asistentes, y el presidente y los académicos de oficios estarán en la mesa.

Cuando visite un magnate la Academia, o haya que satisfacer la curiosidad de asistentes a una Asamblea, se dispondrá lo preciso para realizar experimentos curiosos con tintas invisibles, fósforos y otros preparados químicos semejantes, por cuya combinación se producen raros efectos.

### ***SALA DE SUSTANCIAS QUÍMICAS (DROGAS)***

Un laboratorio y obrador de Química, deberá tener una colección suficiente de sustancias simples y preparadas, de cuerpos naturales y mixtos, que estarán colocados en una sala destinada a ellos en el almacén. Los metales reducidos a barras o a fragmentos ocuparán el primer lugar por su útil y numeroso uso, entre ellos oro, plata, platino, cobre, níquel, hierro, estaño y plomo, juntos con latón (Cu-Zn), acero, bronce (Cu-Sn), la tumbaga (Au-Cu), el cobre blanco (Cu-Ni), etc. A continuación, se colocarán mercurio, alcohol, arsénico, cobalto, zinc, bismuto y antimonio, que se presentarán en barras, hojas, alambres y limaduras, cuya diversa modificación ofrece el oropel, purpurina, oro en panes o reducidos a cales, de los cuales resultan albayalde (carbonato de plomo, de color blanco, que se emplea en pintura), cardenillo (acetato de cobre que se emplea en pintura), almártaga (litargirio, PbO), ferrete (sulfato de cobre empleado en tintorería) y otros. Como la naturaleza es fecunda y variada, convendrá tener metales procedentes de diversos países, así conociendo su diversidad se distinguirá unos de otros, el antimonio de Auvernia (Francia) del de Hungría, el hierro de Vizcaya del de Suecia, etc.

Se debe tener también minerales procedentes de varias minas, así como piedras preciosas, sustancias térreas, calcáreas, arcillosas, bituminosas, cretáceas, salinas, vitrescentes, etc. Se destinará un estante para las conchas, y otro para las sales por su especial uso muy conocido. Igual sitio y precaución debe tenerse para bálsamos, resinas y barnices.

No deben excluirse de dicha colección las partes de animales que sirven de ejercicio a diferentes artistas, huesos, pieles, uñas, cuernos, pelos, lanas, plumas, cerdas y escamas de diferentes animales. También los materiales para alfarería, vidriería y construcción de edificios.

Diversas sustancias, compuestos y preparados químicos con propiedades medicinales y farmacéuticos, que contribuyen al progreso de la Química, deben estar también en dicha sala colocados en estantes separados, tanto los que proceden de nuestras tierras como de los países ultramarinos. También se colocarán sustancias exóticas que no es fácil verlas en otros sitios.

Hay que disponer de una considerable cantidad de ácidos minerales: vitriólico, nítrico, fosfórico, vinagre, y otros. Alcalis fijos y volátiles. Minerales y vegetales, sólidos y líquidos, cáusticos y flogisticados. Sales obtenidas por incineración de plantas, cal viva, agua de cal, lejía de las fábricas de jabón, tártaro perdeliquum (sustancia que forma una costra cristalina en el fondo y en las paredes de la vasija donde fermenta el mosto), ácido tartárico, fundentes de las materias vitriosas conocidos en las fábricas con los nombres de flujo blanco y negro, etc.

Sal amoniacal, sal de Inglaterra o de Glauber (sulfato de sodio), policresta (sulfato de potasio), nitro, tártaro vitriolado, natrón, etc. Después las sales que resultan de la combinación natural o artificial con cuerpos metálicos, como vitriolo romano (sulfato de cobre II pentahidrato), caparrosa (sulfato de hierro II), azul o piedra lipe (sulfato de níquel II), cardenillo (acetato de cobre II), cristales de venus o verdete (combinación de óxido cúprico con ácido acético), tinturas de mercurio (mercurocromo), sublimado de corrosivo (sustancia blanca, volátil y venenosa, que disuelta en agua caliente, se usa como desinfectante energético), manteca de antimonio (triclóruo de antimonio), piedra infernal (mineral del modo normal que se encuentra en el inframundo), etc.

También ocupan un lugar muchos compuestos simples y preparados sin pertenencia a una clase determinada, como varios fragmentos o porciones de piedras y de tierra cretácea (sustrato y *tierra* para plantas), varios metales reducidos a hojas y limadura, ocre (mineral terroso consistente en óxido de hierro monohidrato), lacas y drogas de pintura y de tintes.

Se necesita también preparados y compuestos para usos en Física y Farmacia, como agua común y destilada, nitrógeno, esencia de trementina y de linaza, jabón blando y de piedra, polvo de agallas, tintura de lirios y violetas o sus jarabes, tornasol en pasta o trapo, papel azul y muchos otros géneros o preparados de farmacia, conocidos con los diversos nombres de magisterio de bismuto (oxinitrato de bismuto), vegeto mineral (Se utiliza en tratamiento de inflamaciones y erupciones de la piel usado como astringente), oro fulminante (mezcla de oro, cloro y amoniaco), álcali volátil (amoniaco), licor de espuma (o espuma de licor), éter vitriólico (éter sulfúrico), espíritu de vino (alcohol etílico), y otros muchos géneros apropiados que se omiten, por no ser muy comunes o por no extender más este artículo (sic).

Se debe hallar también los minerales y otros análogos refiriendo sus respectivas minas, piedras preciosas, menos preciosas como ágatas, pedernales, basaltos y alabastros, y con ellas los diversos cuarzos y espatos que sirven para la construcción de edificios, como jaspe, mármol, sillar, pórfido, quija, pizarra, arenaria, y berroqueña, etc. Entre las figuradas y de menor tamaño tenemos piedra del águila, bezoar, ponen, bolonia, crucífera, estrellada, nefrítica, especular, cristal de islanda (sic), dendritas, amianto, talco, mica y estalactitas, etc.

Se destinará un estante para las conchas, aunque no hay necesidad de que se hallen completas las 27 familias que establecen los naturalistas conchitólogos, solo estarán las de usos químicos. También tendrán lugar las aguas minerales, unas medicinales, otras para bebida, baño, o con propiedades recomendable y analizadas por método químico. Por la Química se puede preparar aguas artificiales para los mismos usos, y acaso pre-

ferible a las naturales en beneficio de los pacientes que las necesiten. La experiencia ha mostrado que son provechosas para varios efectos las aguas de la alunada, Riotinto, Alhama, hardales, y otras muchas.

Deberán ocupar un lugar las sales por su uso conocido, entre ellas las sales nativas, líquidas o concretas, como nitro, borax, natrón, alumbre, gema, sal común, calthástica (sal marina), etc. Las sales consideradas por su cristalización, se pueden colocar en la sala destinada a las bujerías. Siguiendo el orden de los productos naturales, se debe tener un lugar en dicha sala para diversas sustancias químicas, judáico, copal, karave o sucino, azabache, asfalto, petróleo, alquitrán, brea, azufre, nafta, carbón de tierra, y otras empleadas en distintos usos, pero separadas de otras del fuego y de la luz artificial, a causa de su inflamabilidad instantánea.

Igual sitio y precaución debe tenerse para bálsamos naturales, resinas y barnices. Ocuparán también un lugar los perfumes y aromas que vienen de India, ámbar y almizcle, algalía, estexaque, benjuí, acoro, nardo galanga, paja de iteca, liquidámbar, espigas, y otras semejantes. Asimismo, tendrán lugar los géneros de especiería que vienen de regiones de Holanda, como diversas especies de pimientas, canela, clavo, gengibre, nuez moscada, macías, amomo, cubebas, vainillas, anchiote, y otros semejantes.

No deben excluirse de dicha colección las partes de animales que sirven de ejercicio a artistas diferentes, huesos, pieles, uñas, cuernos, pelos, lanas, plumas, cerdas y escamas de diferentes animales, acuáticos, anfibios o terrestres.

Podremos colocar también en un mismo estante, pero con separación entre sí, las diferentes drogas que tienen un conocido manejo, tintes como añil, pastel, índigo, granza o rubia, agalla, orchilla, zumacke, krames, gualda, campeche, aparicio, cúrcuma, cochinilla, alazón, entre los que se pueden colocar las drogas pertenecientes al mismo tinte. También deben ocupar un sitio las pinturas minerales o herbáceas, albayalde, bermellón, sombra, cardenillo, ultramar, prusia, carmín, minio, junto a esmaltes, lacas y colores compuestos.

No deben echase de menos en esta colección aquellas sustancias que constituyen la alfarería, vidriería, masclas para la construcción de edificios, vidriados, morteros, dretidos, estucos, lechadas, etc. en cuya respectiva preparación entran las diversas cales metálicas, arenas, arcillas, almortarga, escamas de hierro y de cobre, conocidas con el nombre de machete y ferrete, frite, rocheta, alcohol, caolín y perintze (estos dos son los nombres de las tierras con que los chinos hace su porcelana), safre, cobalto, magnesia, borax, y otras diversas de este calibre.

Pueden contribuir al progreso de la Chimia los simples medicinales, por lo que deben estar colocadas en estante separado los más usuales, los que proceden de nuestras tierras y de los países ultramarinos, cascarilla, besuquillo, jalapa, mechoacán, guaiaco, escamonea, opio, acacia, hipocístidos, hermodáctiles, zarza, tamanindos, seseleos, dítamos, aristoloquia, sándalos, angélica imperatoria, valeriana, contrayerba, polipodio, galbano, manná, mirra, asafétida, china, cardamomos, genciana y otros semejantes, raíces, hojas, frutos, simientes o resinas, o relacionadas con alternantes, purgantes, aromáticos, vomitivos.

Además de estos simples medicinales deben estar los compuestos y preparados químicos con propiedades medicinales y farmacéuticos, cuya preparación y propiedades se pueden ver en las farmacopeas o en los libros de materia médica. Tendrán lugar preferente los preparados de antimonio y mercurio, como regulo e hígado del púmero, azafrán de los metales (óxido de cobalto), kermes mineral (óxido de antimonio sulfurado rojo), polvos de algarrobo (es una alternativa al cacao), panacea común, cinabarina (colorante natural del hongo rojo *pyncoporus sanguineus*), mercurio dulce (cloruro de mercurio I), calomelanos ( $Hg_2Cl_2$ , conocido antiguamente como mercurio córneo), etíope mineral (mezcla de sulfuro de mercurio con azufre, y algunas veces con mercurio metálico), arcano coralino (deutóxido de mercurio). A estos seguirán otros preparados no solo antimoniales y mercuriales, sino de distintas especies conocidos con varias denominaciones.

Se colocarán también simples exóticos que no es fácil verlos en otros sitios, a causa de no encontrarse venales por su rareza en las droguerías públicas, tales vienen a ser entre los metales níquel, platina (antiguo nombre de platino), cobalto y cobre de corinto (nombre antiguo de un mineral del grupo de los carbonatos, Auricalcita). Piedras turquesas, turmalina o eléctrica descubierta por el conde de Caylus. Entre los vegetales fruto de ananas, nuez de hehen, hierba del Paraguay, la resina elástica, bedegar de persia, cera verde de la Luisiana, mora de China, tierra masquiqui, licio, macer, nostoc, y otras igualmente rarísimas cuya descripción, virtud y aplicación de sus propiedades pueden verse en los tratados de farmacia, en los de drogas y en los escritos últimos de Historia Natural (sic).

Como una semejante colección química puede mirarse al mismo tiempo como Gabinete patriótico, deben hallarse en él aquellos simples que pueden ser de beneficio a la agricultura, a los tejidos y a la economía, como son las plantas filamentosas y cereales o sus simientes. Para alimento y vestido puede ser útil el cultivo de pita, ortiga, malva arbórea o malvalisco, esparto, seda vegetal, pino, las diversas suertes de apocinos (Planta apocinácea perenne, que produce un jugo lechoso llamado látex), lino de Riga, algodón. Relacionado con las plantas alimenticias están trigo, raygras, mielga, trebiles, heno y pastos semejantes, con lo que pueden hacerse los prados artificiales y recibir por ello aumento y beneficio para la agricultura y la economía rústica.

## **BIBLIOTECA**

Como es difícil seleccionar colecciones apropiadas de libros de Química, quienes lo hagan deberán tener mucho conocimiento bibliográfico, y las reunirán después de examinar documentos, y reflexionar oportunamente. No se trata de acumular solo los tratados relacionados con esta ciencia, sino interpolar otros de ciencias afines, que tengan entre sí una correspondencia recíproca. Así como la Química presta su ciencia a otras para perfeccionarse, asimismo les son a ella conveniente los documentos de otras. Por esta razón no solo deben considerarse los libros propios de la Química, sino también de Matemáticas, Bellas Artes, Historia, Física, aunque parecen inconexas con la Química,

tienen con ella alguna conexión. Por ejemplo, junto a los libros de las ciencias citadas, deben estar en la Biblioteca los autores alquimistas, por ejemplo, *Lecciones de física experimental*, de Jean-Antoine Nollet, 1743.

La historia de la Química nos informa de las diversas revoluciones que han proporcionado adelantos por medio de los saberes de egipcios, griegos, árabes, en el Renacimiento y la Ilustración. Las obras que primero deben colocarse en la biblioteca, son las de Borellius, Merchino, Conrrigio, Albineo, Hofani, Manget y otros.

Se debe preferir como más clara la *Historia de la Filosofía Hermética* de Nicolás Lenglet du Fresnoy, 1742. Sin olvidar los manuscritos, impresos, códices y cuadernos que contienen noticias importantes para la Química moderna, que se hallan en las Bibliotecas de Leiden, París, Viena, Hamburgo, Lipsia, y otras.

Hay algunos escritos de famosos alquimistas con trabajos importantes para la Química actual, tales son los escritos de Raimundo Lulio, Arnaldo de Villanueva, Basilio Valentino, Rogerio Bacon, Alano de Lila, Alberto Magno, Thratemio, Vocabellada, Bernardo Trevijano, Luis de Comitibus, Henriquez de Sajonia, entre otros autores de materia semejante.

Deben exceptuarse las obras que tratan de la piedra filosofal por estar alejadas de la Química verdadera (sic), entre los que encuentran los tratados de Siphoras, Hermes el Trimegisto, y de los célebres Geber, Demócrito, Synesio y Heliodoro, así como los de Zósimo, Razés y Avicena, Almanzor y Almamon, Benhamin, Salmaria, Calid, Sydrach, Zacharias, Sephar y Oftanes. Las de los alquimistas o químicos de la Edad Media, y de siglos posteriores como las de Artefio, Sendilogo, Flamel, Rippl, Roberto Flud, Juan de Meum, Butler, Cosmopolita, Filaleta, Grabardolo, Penoto y Hogelanoa, el conde de Gabalis, el barón Bellosol.

Otros libros contienen una doctrina útil, pero al ser la puerilidad lo que predomina en ellos, se consideran incompatibles con nuestra Biblioteca, por ejemplo, los de Paracelso, Helmont, Cardano, Cornelio Agripa, Juan Baptista Porta, el caballero Born, Lucateli, Quegnoz y Fiorabanti.

Entre los libros más oportunos están los de Johan Joachim Becher (1635-1682), considerado príncipe de la Química moderna, al ser uno de los primeros que poseyeron una idea científica netamente distinta de la de los alquimistas. Aunque fue el padre de la teoría del flogisto, que él concibió como principio de inflamabilidad, al suponer que cuando una sustancia arde, otra sustancia se libera, la *terra pinguis* ("tierra crasa").

La obra por la que Becher suele ser citado en la Historia de la Química fue publicada en 1669 y recogía sus experiencias en el laboratorio de Munich. El texto es habitualmente conocido por *Physica Subterranea* (1669), gracias a la edición que realizó Georg Ernst Stahl (1659-1734) en 1703. En ella exponía desde un nuevo punto de vista las teorías de Paracelso, fundador de la iatroquímica, en las que admitía la participación de mercurio, azufre y sal en la composición de los cuerpos orgánicos, por lo tanto de los organismos vivos. Becher pensó sustituir, al menos en la composición de los cuerpos inorgánicos, es decir, "subterrestres", los tres elementos de Paracelso por tres "tierras", que corresponderían, más o menos, a los óxidos de hoy. Y estas tierras eran "tierra mercurial", "tierra vítrea" y "tierra carbonosa o pinguis". Las propiedades de cada cuerpo



(afirma Becher) están relacionadas con la presencia y la cantidad relativa de estas tierras fundamentales.

Escribió otros tratados de doctrina química en latín, impresos y reimpresos muchos de ellos en Fráncfort, Leipzig y Maguncia, pero llenos de enigmas y oscuridad, que a no haberse propuesto Stahl comentarlos, hubiesen permanecidos inútiles por ininteligibles.

Otro libro a tener en la Biblioteca es la parte primera, de Elementos de Química, de Herman Boerhaave (1668-1738), contiene preparaciones de compuestos medicinales, a la que los médicos de Sevilla tenían en mucha estimación.

Es importante que ocupara un lugar los escritos de Robert Boyle (1627-1691), todas sus obras pertenecen a las ciencias naturales y son dignas de su colocación. Mencionamos *Nuevos experimentos físico-mecánicos acerca de la elasticidad del aire y sus efectos* (1660), y en la segunda edición (1662) expuso la famosa propiedad de los gases conocida con el nombre de ley de Boyle-Mariotte. En *The Sceptical Chemist* (1661) ataca la teoría aristotélica de los cuatro elementos, así como los tres principios de Paracelso. Y propuso el concepto de partículas fundamentales que, al combinarse entre sí en diversas proporciones, generan las distintas materias conocidas, prefigurando con más de cien años de antelación los descubrimientos y aportaciones que a finales del siglo XVIII, harían Antoine Lavoisier y John Dalton, y que conducirían a la fundación de la química moderna.

Asimismo, los escritos de los químicos franceses coetáneos de Nicolás Lemery (1645-1715), que en dicha ciencia comparten época con Luis XIV, pueden ocupar lugar muy distinguido en nuestra biblioteca. Réaumur, Duhamel, Glacer, Lemery padre e hijo, Lefebre, Bouzdchin, Geoffrey, Dodard, Bolduc, entre otros. También las obras de los químicos alemanes, holandeses e italianos que florecieron en dicho tiempo, Homberg, Iac, Hellot, Gellert, Cramen, Spielman, Kintel, Merrat, Antonio Neri, Poli, Olbach, Thirnacam, y otros muchos son de un distinguido mérito. La Sociedad Patriótica una vez compendiado el juicio y mérito de estas obras, podrá comprarlas sin temor a engañarse.

Se hallan también discursos sueltos y Memorias periódicas sobre Química en Gacetas literarias y Diarios, establecidos hace tiempo entre los extranjeros. Muchos están traducidos al castellano en Madrid, y en ellos se anuncian ediciones venales por meses o semanas, siendo muy dignos de colocarse en la Biblioteca. En algunos de estos escritos químicos tiene importancia las colecciones mineralógica y metalúrgica, en las que tratan además de Química, Geografía e Historia, y se deberá adquirir las obras de los autores más conocidos, entre ellos se elegirán preferentemente a Agrícola, Baucman, Valerio, Schenzen, Pot, Hil, Otenchel, Bertrand y otros escritores, oritógrafos y metalúrgicos.

Del ramo de Química metálica o docimasia, será conveniente adquirir las obras de muchos autores españoles que han escrito acerca de nuestras minas en uno y otro continente, como Fernández, Acosta, Davila, Castillo, Muñoz, Alonso Barba, y otros de los que hace particular Memoria Nicolás Antonio, pero se han hecho tan raras ediciones de estos, por la desproporción o limitado uso de nuestra imprenta, que no es fácil adquirir ejemplar de alguno de ellos. A estos se unirán las obras de autores químicos recientemente fallecidos, y de los químicos vivos que actualmente estén ocupados en iguales investigaciones. En este copioso número podemos colocar a Baume, Roveelle, Macquer,

Senac y Atalovin, Buchoz, Monbet, Margraf, Perner, Baron, Aragbride, Priestley, Moreau, Becari, Parmentier y otros de distantes naciones, que por omitirlos ahora no deben considerarse menos apreciables.

A una biblioteca química es necesario añadir Historia Natural de Bomare, y el Diccionario de Mr. Macquer. Y obras de Pintura, Física, Farmacia, Fisiología, etc. y entre las artes esmaltador, charolista, lapidario, destilador, cocinero, y semejantes.

### ***SALA DE CURIOSIDADES Y BUJERÍAS***

Los hombres han procurado en todos los tiempos conservar aquellas materias raras o singulares para satisfacer su curiosidad, servir de adorno, dar culto a deidades, para uso supersticioso y vanidoso. Sin embargo, en el siglo XVIII se han publicado colecciones útiles sobre pesos y medidas, lámparas sepulcrales, e instrumentos de sacrificios, y otras materias que componen hoy día la fecunda ciencia de los medallistas y anticuarios. Pero no sólo en estos ha influido, también en Academias, Congresos, en Historia Natural, en Física en sus experiencias, e incluso en planos arquitectónicos, en pintura, en esculturas de estatuas, en dioptría y sus vidrios, en catóptrica y sus espejos, en alfarería y porcelanas, en vidriería y sus esmaltes, en anatomía, en disecciones y en esqueletos.

También tendrán un lugar el vidriado y porcelanas, esmaltes, charoles y vasijas, jaspes, mármoles y piedras, metales reducidos a láminas, hilados y tejidos, pinturas, estampados y tintes, objetos de lana, seda, cuero, lino, cerda, pita, esparto, mimbre, junco y hueso, y otras varias curiosidades, como papeles, lienzos, bordados, flores contrahechas, dibujos, aderezos, adornos de vajilla, joyas, juguetes. Estos objetos irán acompañados cada uno de una descripción de sus oficios correspondientes, a qué están destinados, las variedades que comprenden, magnitudes que ocupan y las figuras que lo demuestran.

Además, se exhibirán utensilios de vidrio mostrando las diferencias entre unos y otros, según provengan de Japón, China, Venecia, Sajonia, Holanda, Nápoles, Francia e Inglaterra. Y de España los de Valencia, Talavera, Sevilla, Puente de Don Gonzalo (Córdoba), San Ildefonso (Segovia) y de otras ciudades. Hay vidrios particulares para experiencias de Física y de Óptica: vidrios más o menos densos, duros o claros, con los que se construyen lentes acromáticas, vidrios para barómetros, anteojos de colores, faroles y vidrieras de iglesia, ojos de cristal para esculturas, vidrio negro para botellas, vidrios opacos de colores, y los vidrios antiguamente esmaltados para hacer arañas, plumas, remates, laminitas, retratos y otros. Todos estarán acompañados de una explicación sobre su relación con la Química.

Mención especial merece el papel, ya que por la imprenta se ha dado a conocer los trabajos y avances de la Química, ya referidos, y es oportuno exponer diversas muestras de papeles antiguos y modernos.

Además, entre otros se mostrará el cuero, y cómo se prepara para las distintas aplicaciones y usos que puede hacerse.

En conclusión. La colección de bujerías no es un adorno simple de dicha sala, constituye un aparato que no debe carecer de él un laboratorio, al ser atractivo a la ciencia para su enseñanza y manejo.

## **JARDÍN O HUERTO**

El jardín colocado en un laboratorio de Química desempeña una precisa relación con él por medio de la agricultura, la cual recibe de la Química conocimientos para beneficiar las tierras preparándolas según su respectiva naturaleza, y hacerlas pingües y feraces aún a las más estériles. Aporta beneficios derivados de la trasplantación, injertos y análisis y, por otra parte, puede servir de recreo. Muchas veces hay que analizar en un laboratorio un árbol, arbusto, planta o hierba, sobre alguna de sus partes, corteza, hoja, flor o fruto, para mejorar su vegetación o variar su estructura. Son muchas las plantas de las que se saca azúcar, cera, pan, miel, almidón, barnices, pinturas, colores para tintes, yescas, algodones, licores aromáticos y productos medicinales, mediante trasplantes, injertos u otras operaciones conocidas, de las que se preparan hilados y tejidos. Las que sirven para tintes, y pinturas, Hay plantas para usos domésticos, medicinales y fabriles.

Por ejemplo, Andreas Sigismund Marggraf (1709-1782), químico alemán, pionero de la Química Analítica en Berlín, introdujo varios métodos nuevos en la Química experimental, detectó sales de metales alcalinos en las cenizas de plantas y las identificó mediante ensayo a la llama. Extrajo azúcar a partir de remolacha, que entonces sólo estaba disponible de la caña de azúcar, lo que fue el inicio del sector azucarero en Europa. Esto es lo que muchos autores antiguos, Dioscórides, Plinio, Galeno, Avicena, y otros árabes, han venido a indicarnos como adherente a muchos vegetales con el nombre de tabaxia.

## **OFICINA O DESPACHO DE GÉNEROS VENALES. LA BOTICA**

Es necesario tener un despacho de géneros venales, considerado Botica, cuyo director debe ser un profesor de Química y de Farmacia, auxiliado por un buen boticario químico.

La Botica se construirá en la planta baja, con entrada desde la calle, con extensión de al menos entre 5,015 y 6,687 metros de lado. Habrá un mostrador de madera sólida situado en medio. Las paredes se revestirán con estanterías con gradas y huecos para colocar vasijas de distintos tamaños, construidas del material adecuado a la naturaleza de las sustancias que contenga. También habrá unos aparadores con pesos, medidas, caretas, almireces, cucharas, espátulas, y otros instrumentos necesarios.

Se acostumbraba a escribir los rótulos indicativos del contenido de las vasijas en latín y con abreviaturas, hasta que el Protomedicato lo reformó, a imitación de Francia donde lo escriben en su propia lengua, así que a partir desde entonces se escriben en castellano y sin abreviatura.

Durante el siglo XVIII la terapéutica no era única, sino un conjunto de diferentes tendencias muchas veces incompatibles entre sí. Eclecticismo, empirismo, dogmatismo, galenismo, yatroquimismo y farmacia popular, pugnan por imponerse sin conseguirlo.

Las opciones terapéuticas del siglo XVIII configuran un escenario abierto, en el que se acumulan y en ocasiones se mezclan remedios procedentes de diversas concepciones del organismo humano y del medicamento. La época es pródiga en polémicas y

controversias: dogmáticos contra empiristas, teóricos frente a escépticos, galenistas en oposición a los yatroquímicos, naturistas contra los partidarios de que el médico realice una intervención enérgica, aunque violenta a la naturaleza del enfermo, remedios oficiales y académicos, y frente a ellos la farmacia barata, doméstica y popular, con sus remedios caseros. Es una terapéutica en la que había teorías, disputas, controversias y remedios. Los galenistas y los yatroquímicos protagonizaron el principal enfrentamiento ideológico, pero hubo otras muchas polémicas. Un ejemplo, la homeopatía se une a tan abigarrado escenario y proliferan terapéuticas heterodoxas: el agua y la música y el agua de alquitrán de Berkeley como panacea.

Georges Berkeley (1685-1753) fue un importante filósofo que se opuso al racionalismo abstracto de los matemáticos y físicos de su época. Escribió un texto desconcertante si se tiene en cuenta que era uno de los más relevantes filósofos de su tiempo: *Siris. Cadena de reflexiones filosóficas y de investigaciones concernientes a las virtudes del agua de alquitrán y otros diversos temas relacionados unos con otros y naciendo unos de otros* (1744). Se trata, como su nombre indica, un estudio de las posibilidades terapéuticas del agua de alquitrán, que para Berkeley es una panacea material y espiritual, y al estar vinculada con el éter y el fuego, permite recuperar la energía y la salud.

Los preparados y compuestos en la Botica se dividían en productos Chímicos para remedios de enfermedades, condimentos alimenticios, golosina, tintas y pinturas para la escritura. No pueden faltar medicinas simples, medicinas galénicas (es decir, las que se hicieron hasta el tiempo de Paracelso) y medicinas chímicas, que pueden ser vegetales, animales y minerales o fósiles. Estos tres tipos de medicinas se han complementado con la clasificación de exóticas o indígenas de América, y las vegetales divididas a su vez en raíces, cortezas, leños, hojas, frutos, simientes, flores, resinas, gomas, y las animales y minerales según sus partes respectivas.

Estaban disponibles también sustancias chímicas para curiosas experiencias de Física. Verbigracia, mutaciones de colores por las soluciones del sublimado corrosivo de sal de tártaro, vitriolo de Chipre, sal amoniaco, oropimente, cal, palo nefrítico, tornasol, infusión de rosas, espíritu de vino, ácido nitroso y vitriólico, y otros preparados que con nombres determinados pueden despacharse para diversión de aficionados y curiosos.

Para el gasto de las necesidades de la Botica, la Sociedad Patriótica podía recurrir a la Casa Arzobispal, la Real Maestranza, San Lázaro, San Telmo, Los Toribios, La Caridad de los locos, otros hospitales y casas religiosas, que tal vez pueden contribuir a la misma.

Las diversas visitas anuales o perpetuas a las Boticas, las dirige el Protomedicato enviando a los facultativos que les parece eficientes para ello, y en Sevilla hay profesores con méritos y honores para desempeñarla cumplidamente.

## CONCLUSIÓN

Para la perfecta descripción de un laboratorio se requería redactar una relación de los artículos pertenecientes al establecimiento de fábricas y manufacturas, no obstante,

somos conscientes que la exposición de investigaciones o pesquisas de nuevos edificios y talleres, así como el particular orden y manejo que deberían observar en su práctica los ya establecidos en Sevilla, deben quedar para tratarse en la Academia, después que esta se halle erigida, a causa de las muchas consideraciones que necesita su respectiva exposición.

Entretanto se debe conocer que el establecimiento y perfección de los diversos ejercicios tienen principalmente dos aspectos a considerar: Uno es la parte científica o instructiva de sus conocimientos, y otro la conservación o protección necesaria para su mejora y ventaja de la Química. Sin embargo, no basta conocer los documentos que pueden tener relación con su instrucción, sino que es necesario impedir los obstáculos que se oponen, o pueden ser contrarios a su progreso. Para conseguir el primer intento puede bastar nuestra diligencia, aplicación o solicitud, pero para el segundo es menester un superior Decreto o autoridad.

Siendo estos impedimentos tanto en número como de diversas causas, no es fácil exponerlos en esta Memoria sin extenderla considerablemente. Sabiendo la Sociedad Patriótica que estos inconvenientes son obstáculos que retrasaría perfeccionar y hacer progresar las artes en general, prestará especial atención a continuar las influencias del rey dirigidas hacia la estimación y utilidad de dichas artes.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- ARCHIVO DE LA SOCIEDAD ECONÓMICA DEL PAÍS DE SEVILLA, Legajo 53.
- CALDERÓN ESPAÑA, M.C. (1991) *La Sociedad Económica de Amigos del País: Una Institución clave para la educación en Sevilla: (1775-1900)*. (Tesis Doctoral).
- CANO PAVÓN, J.M. (1996) *La Escuela Industrial Sevillana (1850-1866)*, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 24-25.
- (1993) *La ciencia en Sevilla (siglos XVI-XX)*, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 29-30, 32, 38-39.
- DOMÍNGUEZ ORTIZ, A. y AGUILAR PIÑAL, F. (1976) *Historia de Sevilla. El Barroco y la Ilustración*, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 250-251.
- DURÁN GUARDEÑO, A. y CURBERA COSTELLO, G. (2005) “Quinientos años de Matemáticas en Sevilla y algunos menos en la Universidad”, *Historia de los Estudios e Investigación en Ciencias en la Universidad de Sevilla*, coord., Manuel Castillo Martos, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, p.91.
- IGLESIAS RODRÍGUEZ, J, J. (2018). La Sevilla del siglo XVIII, en BELTRÁN FORTES, J. Y MÉNDEZ RODRÍGUEZ, L. (Coord.), (2018). *Sevilla en el siglo de la Ilustración. Cultura arte y ciencia en la ciudad del XVIII*, Editorial Universidad de Sevilla.
- VILLANUEVA, D. (2021), *Morderse la lengua. Corrección política y posverdad*, Espasa, sello editorial de Planeta, S.A., Barcelona.
- VV.AA. (2003). *La Casa Academia de Minas. 225 años de su fundación*, Escuela Universitaria Politécnica de Almadén y Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Minas de Almadén, pp. 30-31.



# ***RELIGIÓN Y CIENCIA: ¿COEXISTENCIA, COMPLEMENTARIEDAD, CONVERGENCIA O CONFLICTO?***

*Conferencia pronunciada por el  
Ilmo. Sr. D. Agustín García Asuero,  
dentro del ciclo “Historia y Filosofía  
de la Ciencia y de la Técnica”,  
el día 9 de mayo de 2022.*

## **RESUMEN**

En esta conferencia se aborda el tema de las relaciones entre la religión y ciencia tratando de ofrecer una perspectiva general introductoria que sirva de base para profundizar más en esta interesante materia, un nuevo clásico a tenor de las interesantes aportaciones que se producen en la actualidad desde campos muy diversos. Se presta atención no solo a los trabajos especializados y a las monografías existentes en el campo, sino también a las manifestaciones en la prensa diaria, dada la relevancia del binomio en cuestión para el ser humano, que, con independencia de la posición individual adoptada en cada caso, nunca es objeto de indiferencia, siendo objeto de la mayor atención. Se recoge mucha información en forma tabular con propósitos didácticos, ordenando así un tanto la información disponible. Los dominios de la ciencia y la religión no son estáticos ni están netamente definidos tendiendo a expandirse lo que favorece la continuación del debate.

## **RELIGIÓN Y CIENCIA: UN ÁREA DE CONOCIMIENTO**

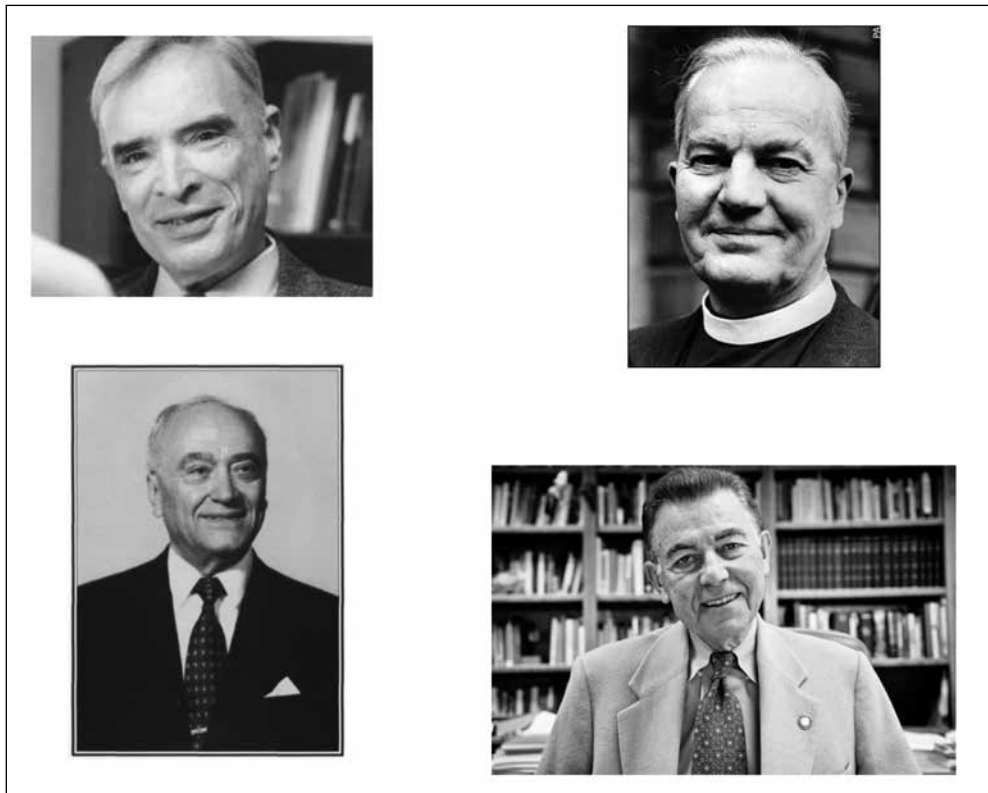
Religión y Ciencia conforman desde mediados del siglo pasado un área de conocimiento (McGrath, 2022), con un cuerpo de doctrina, una masa crítica de investigadores (Figs. 1 y 2) en el campo, y numerosas publicaciones recogidas en revistas de reconocido prestigio (Tabla 1), habiendo contribuido ampliamente en esta dirección, con la puesta en marcha de estudios sistemáticos los que pueden considerarse como pioneros, entre los que destacan Ian Graeme Barbour (1923-2013), estadounidense (Fig. 1a), y Thomas Forsyth Torrance (1913-2007), escocés (Fig. 1b), ambos nacidos en China.

Se dispone de revistas específicas del área (Tabla 1) (EEUU, Reino Unido, Europa Continental, España y América Latina), Cátedras Académicas (Tabla 2) (Andreas

Idreos (Fig. 1c) en Ciencia y Religión de Oxford, la Ian Barbour de Teología y Ciencia en la GTU (Graduate Technological Union) California, o la de Ciencia, Tecnología y Religión Francisco José Ayala (Fig. 1d) de la Universidad Pontificia Comillas (Escuela Técnica Superior de Ingeniería), Centros para el estudio de las relaciones entre Ciencia y Religión (Tabla 3), Asociaciones Académicas Internacionales (Tabla 4), Manuales y compendios de la materia (Tabla 5), facilidades para realizar el Doctorado en Ciencia y Religión (Tabla 6), Premios existentes (Tabla 7), Teólogos (Tabla 8), Filósofos (Tabla 9), Historiadores (Tabla 10), Sociólogos (Tabla 11) y científicos (Tabla 12) (Fig. 2). Existen filósofos interesados en la ciencia y científicos interesado en la Religión.

**FIGURA 1**

**IAN GRAEME BARBOUR (1923-2013) (a: superior izq.), THOMAS FORSYTH TORRANCE (b: superior derecha), ANDREAS IDREOS (1917-1998) (c: inferior izq.) y FRANCISCO JOSÉ AYALA PEREDA (1934-2023) (d: inferior derecha).**





**FIGURA 2**  
**TEÓLOGOS, FILÓSOFOS, HISTORIADORES, CIENTÍFICOS**  
**ESTUDIOSOS DEL CAMPO RELIGIÓN Y CIENCIA**

<b>Teólogos</b>	<b>Filósofos</b>	<b>Historiadores</b>	<b>Científicos</b>
Philic Clayton (1956- ) Claremont School of Theology	Juan Arana (1950- ) Filosofía de la Naturaleza Universidad de Sevilla	Peter Bowler (1944- ) Historiador de la Biología	Francisco Ayala (1934- ) California University (Irvine)
Sarah Anne Coakely (1951- ) University of St. Andrews	Helen De Cruz (1978- ) Danforth Chair of Philosophy University of St. Louis (MO)	John Hedley Brooke (1944- ) Andreas Idreos Professor University of Oxford	Ian Graeme Barbour (1923-2013) Carleton College en Northfield
John Haught (1942- ) University of Georgetown	Nancy Murphy (1951- ) Seminario Teológico Fuller Pasadena (CA)	Geoffrey Cantor (1943- ) History of Science University of Leeds	Celia Deane-Drummond (1956- ) University of Notre Dame (2011-2019)
Ted Peters (1941- ) Pacific Theological Seminary GTU Berkeley, CA	Willem B. Drees (1954- ) Universidad de Tiburg (Países Bajos) desde 2014	Fern Elsdon-Baker Science Knowledge and Belief University of Birmingham	Alister McGrath (1953- ) Faculty of Theology University of Oxford
Mikael Stenmark (1962- ) Faculty of Theology, University of Uppsala	Michel Onfray Fundador de la Universidad Popular de Caen (Francia)	Peter Harrison (1955- ) Humanities Studies University of Queensland	Arthur Peacocke (1924-2006) Clare College University of Oxford
Ignacio Silva Universidad Austral Argentina	Robert Pennok Universidad Estatal de Michigan	Bernard Lightman (1950- ) York University Totonto (Ontario)	John Polkinghorne (1930- 2021) Queen's College University of Cambridge
Thomas Forsyth Torrance (1913-2007) New College University of Edinburgh	Andrew Pinsent (1966- ) Director Ian Ramsey Center University of Oxford	David Noel Livingstone (1953- ) History Geography Queen's University Belfast	Javier Sánchez Cañizares (1970- ) Ciencia, Razón y Fe, Universidad de Navarra
Tom Aechtner Historical and Philosophical Inquiry University of Queensland	Alvin Plantinga (1932- ) University of Notre Dame/ Calvin University	Ronald Numbers (1942- ) History of Science University of Wisconsin	Elaine Ecklund Social Sciences Rice University

**TABLA 1**  
**REVISTAS CIENTIFICAS SOBRE RELIGIÓN Y CIENCIA**

<b>EEUU</b>
Zygon Journal of Religion and Science (Chicago) Theology and Science (2003), continuación del Bulletin del “Center for Theology and Natural Sciences” (CTNS) Bulletin 1981-2002. Science, Religion and Culture (2014) (Publons)
<b>REINO UNIDO</b>
Science and Christian Belief (1989) - semestral. Reviews in Science and Religion (1976) – semestral (Mayo y Noviembre; edición electrónica Marzo y Septiembre)
<b>EUROPA CONTINENTAL</b>
European Journal of Science and Theology (2005) Scientia et Fides (2013) Philosophy, Theology, and the Sciences (2014)
<b>AMERICA LATINA</b>
Quarentibus

**TABLA 2**

**CÁTEDRAS DE RELIGIÓN Y CIENCIA**

Cátedra Andreas Idreos en Ciencia y Religión (Oxford) – Alister McGrath (1953- )  
Cátedra Ian G. Barbour (1923-2013) de Teología y Ciencia (Graduate Technological Union, GTU, California)  
Cátedra Francisco José Ayala (1934- ) de Ciencia, Tecnología y Religión (Universidad Pontificia Comillas). Dominico/ deja los hábitos.  
Cátedra Danforth de Estudios Teológicos  
Conferencias Dwight H. Terry (1905) (Universidad de Yale). Objeto involucrar a estudiantes y público a considerar la religión desde un punto de vista humanista, a la luz de la ciencia y la tecnología moderna. Análoga a las Guildford Lectures  
Sterling Professor of Divinity (Universidad de Yale)

**TABLA 3**

**CENTROS PARA EL ESTUDIO DE RELIGIÓN Y CIENCIA**

Centro Zygon para la Religión y la Ciencia (Chicago)  
Centro para la Teología y Ciencias Naturales (Berkeley)  
Centro Ian Ramsay para la Ciencia y la Religión (Oxford)  
Instituto Faraday de Ciencia y Religión (Cambridge)  
Centro de Documentación Interdisciplinar de la Ciencia y la Fe (Roma)  
Grupo Ciencia, Razón y Fe (Pamplona)  
Centro de Ciencia & Fe (Madrid)  
Fundación Diálogo entre Ciencia y Religión (Universidad Austral)  
Instituto de Filosofía (Universidad Austral)  
Centro de Estudios Teológicos y de las Religiones (Bogotá)  
Centro de Estudios de Ciencia y Religión (Puebla, México)

**TABLA 4**

**ASOCIACIONES ACADÉMICAS INTERNACIONALES**

**International Society for Science and Religion (ISSR).** Sociedad científica fundada en 2001 con el propósito de promover la educación mediante el apoyo del aprendizaje y la investigación interdisciplinarios en los campos de la ciencia y la religión llevados a cabo en la medida de lo posible en un contexto internacional y multiconfesional. La Sociedad se conformó tras unas jornadas de cuatro días celebradas en Granada, España. La secretaría está en St. Edmund College en Cambridge.

**Science and Religion Forum** (1970's). Sociedad multidisciplinaria que trabaja para promover la comprensión pública de la relación entre ciencia y teología. Encuentro en Durham, 1975 – Arthur Peacocke (Robinson, 2012)

**TABLA 4 (CONTINUACIÓN)**

**European Society for the Study of Science and Theology (ESSAT)** (1980's). Organización académica, no confesional, con sede en Europa, que tiene como objetivo promover el estudio de las relaciones entre las ciencias naturales y los puntos de vista teológicos. ESSAT tiene miembros de casi todos los países europeos, así como de otros continentes. Tienen diferentes antecedentes confesionales e incluye tanto a creyentes como a no creyentes y ateos. Cada dos años, ESSAT organiza una conferencia internacional, cada vez en un lugar diferente en Europa.

**Society of Catholic Scientists.** Organización internacional que fomenta el compañerismo entre científicos católicos y da testimonio de la armonía de la fe y la razón. Trata de responder a la llamada del Papa San Juan Pablo II de que “los miembros de la Iglesia que son científicos activos” estén al servicio de quienes intentan “integrar los mundos de la ciencia y la religión en sus propias vidas intelectuales y espirituales”. La Sociedad acomete esta tarea a través de conferencias anuales, simposios y seminarios, grupos de discusión, conferencias y otras actividades (Universidad de Seton Hall, Nueva Jersey).

**TABLA 5  
MANUALES Y COMPENDIOS SOBRE RELIGIÓN Y CIENCIA**

Oxford Handbook for Religion and Science (2008) (Ed. Philip Clayton)  
 Cambridge Companion for Science and Religion (2010) (Ed. Peter Harrison); traducción Ciencia y Religión (2017)  
 Interdisciplinary Encyclopedia of Religion and Science (Ed. Giuseppe Tazizella-Notti)- publicado también en italiano

**TABLA 6  
DOCTORADO EN CIENCIA Y RELIGION**

Oxford University  
 Edinburgh University  
 Graduate Technological Union (GTU) (EEUU)  
 Universidad Pontificia Comillas (España)  
 Ateneo Pontificio Regina Apostolorum (Italia)  
 Universidad Mariano Gálvez (Guatemala)

**TABLA 7  
PREMIOS RELIGIÓN Y CIENCIA**

**Premio Templeton** (1972). Preguntas más profundas del Universo y el lugar y el propósito de la humanidad dentro de él utilizando el poder de las ciencias)

**Razón abierta** (2017) – Premio Anual a 2 investigadores y 2 docentes que hayan promovido un diálogo activo con la filosofía y la teología desde su ciencia particular.

**TABLA 8**  
**TEÓLOGOS IMPLICADOS EN EL ESTUDIO DE LA RELIGIÓN Y CIENCIA**

<p><b>Harol W. Attridge.</b> Erudito. Exégesis Nuevo Testamento, especialmente Epístola a los Hebreos, Estudio del Judaísmo Helenista, e Historia de la Iglesia Primitiva. “Sterling Professor of Divinity” en la Universidad de Yale. Decano en el período 2002-2012, primer católico en dirigir dicha Escuela históricamente un feudo protestante.</p>
<p><b>Philip Clayton (1956- ).</b> Filósofo estadounidense de la religión y filósofo de la ciencia; intersección de la ciencia, la ética y la sociedad. Actualmente ocupa la Cátedra Ingraham en la Escuela de Teología de Claremont.</p>
<p><b>Sarah Anne Coakley (1951- ).</b> Sacerdote anglicano inglés, teólogo sistemático y filósofo de la religión con intereses interdisciplinarios. Es profesora honoraria en el Logos Institute, la Universidad de St Andrews, tras renunciar como profesora Norris-Hulse de Divinidad (2007-2018) en la Universidad de Cambridge</p>
<p><b>Lucio Florio,</b> Licenciatura en Teología en la Universidad “San Tommaso d’Aquino (Roma) y Doctorado en Teología Dogmática en la Pontificia Universidad Católica Argentina (Buenos Aires), de la que es investigador y docente.</p>
<p><b>John Haight (1942- ).</b> Senior Fellow de Ciencia y la Religión, en el Centro Teológico Woodstock de la Universidad de Georgetown, Columbia. Cursos sobre el problema de Dios, el método teológico, la Ciencia y la Religión, y Religión y Ecología.</p>
<p><b>Noreen Herzfeld –</b> Graduada en la Unión Teológica de Berkeley. Nicholas and Bernice Reuter Prof. Ciencia y Religión – St. John University – Minnesota. Enseña teología a la luz de la ciencia y tradiciones espirituales del islam.</p>
<p><b>Ted Peters (1941- ).</b> Teólogo luterano estadounidense y profesor emérito de Teología Sistemática y Ética en el Seminario Teológico Luterano del Pacífico y la Unión Teológica de Graduados, Berkeley, California, CA.</p>
<p><b>Ignacio Silva –</b> Profesor de Teología y Ciencias en el Instituto de Filosofía de la Universidad Austral (Buenos Aires). Previamente Centro Ian Ramsey para la Ciencia y la Religión, Facultad de Teología y Religión de la Universidad de Oxford.</p>
<p><b>Mikael Stenmark (1962- ).</b> Decano de la Facultad de Teología y Profesor de Filosofía de la Religión en el Departamento de Teología, Universidad de Uppsala, Suecia.</p>
<p><b>Giuseppe Tanzalla Nitti.</b> Licenciado en Astronomía por la Universidad de Bolonia (1977) y Doctor en Teología Dogmática por la Pontificia Universidad de la Santa Cruz (1991, Roma), de la que actualmente es profesor.</p>
<p><b>Thomas Forsyth Torrance (1913-2007).</b> Teólogo y ministro protestante escocés. Torrance sirvió durante 27 años como profesor de dogmática cristiana en New College, en la Universidad de Edimburgo.</p>

**TABLA 9**  
**FILÓSOFOS IMPLICADOS EN EL ESTUDIO DE LA RELIGIÓN Y CIENCIA**

<b>Juan Arana (1950- )</b> . Natural de S. Adrián, Navarra. Catedrático de Filosofía de la Naturaleza en la Universidad de Sevilla. Autor de la obra “Ciencia y Religión: enemigas o aliadas”.
<b>Mariano Artigas Mayayo (1938-2006)</b> . Filósofo y sacerdote católico español. Doctor en filosofía y en física. Presta especial atención a la conciliación entre razón y fe, que trató en libros, artículos y conferencias. Profundo estudioso de la obra de Karl Popper.
<b>Francisco O’Reilly (1979- )</b> . Licenciado y profesor en Filosofía por la Universidad del Norte Santo Tomás de Aquino (UNSTA), S. Miguel de Tucumán, Argentina. Decano Facultad de Humanidades y Educación de la Universidad de Montevideo. Recepción latina del mundo árabe y relaciones entre ciencia y religión.
<b>Agnaldo Cuoco Portugal</b> . Profesor asociado del Departamento de Filosofía de la Universidad de Brasilia. Filosofía y epistemología de la Religión y de la Ciencia Doctorado en Filosofía de la Religión en el King’s College de la Universidad de Londres.
<b>Helen De Cruz (1978- )</b> . Filósofa belga y presidenta de filosofía de Danforth en la Universidad de Saint Louis, especializada en filosofía de la religión, filosofía experimental y filosofía de la ciencia cognitiva.
<b>Willen B. Drees (1954- )</b> . Filósofo holandés, Profesor de Filosofía de las Humanidades en la Universidad de Tiburg – Países Bajos – desde 2014.
<b>Margaret Morrison (1954-2021)</b> . Filósofa de la ciencia canadiense, Emérita por la Universidad de Toronto. Miembro de la Academia Leopoldina, de la Royal Society de Canadá y de la Academia Internacional de Filosofía de las Ciencias.
<b>Nancey Murphy (1951- )</b> . Filósofa, teóloga estadounidense y profesora de Filosofía Cristiana en el Seminario Teológico Fuller en Pasadena, California.
<b>Michel Onfray</b> . Filósofo francés, materialista, hedonista, ético y ateo. Fundador de la Universidad Popular de Caen (Francia), Nietzscheano iconoclasta.
<b>Robert T. Pennock</b> . filósofo que trabaja en el proyecto del organismo digital Avida en la Universidad Estatal de Michigan, donde ha sido profesor titular desde 2000. Pennock fue testigo en el juicio Kitzmiller vs. Dover.
<b>Andrew Pinent (1966- )</b> . Director del Centro Ian Ramsey para la Ciencia y la Religión de la Facultad de Teología y Religión de la Universidad de Oxford.
<b>Alvin Plantinga (1932- )</b> . Universidad de Notre Dame (Indiana). Ha impartido las “Gifford Lectures”. La Revista Time lo califica como el filósofo de Dios ortodoxo protestante líder de los EEUU.
<b>Menon Sangeetha</b> – Filósofa de la psicología con gran interés en la conciencia. Experta en filosofía hindú, estudios de conciencia, filosofía y psicología del yo. National Institute of Advanced Studies, Bengaluru (India).
<b>Juan José Sanguinetti (1946- )</b> , Buenos Aires). Doctor en Filosofía por la Universidad de Navarra. Catedrático de Filosofía del Conocimiento en la Universidad Pontificia de la Santa Cruz (Opus Dei), Roma.
<b>Francisco José Soler Gil (1959- )</b> . – Doctor en filosofía de la física por la Universidad de Bremen (Alemania). Filosofía y Lógica, y Filosofía de la Ciencia. Universidad de Sevilla.

**TABLA 10**  
**HISTORIADORES EN EL CAMPO DE LA RELIGIÓN Y CIENCIA**

<p><b>Miguel de Asna (1952- )</b>. Médico y Doctor en medicina (Universidad de Buenos Aires), Bachiller y Licenciado en Teología (Universidad Católica Argentina), Master en Historia y Filosofía de la Ciencia y Ph. D. en Historia (University of Notre Dame, EE.UU.). Miembro vitalicio de St. Edmund's College y de Clare Hall (University of Cambridge).</p>
<p><b>Peter Bowler (1944- )</b>. Historiador de la Biología, que ha escrito extensamente sobre la historia del pensamiento evolutivo.</p>
<p><b>John Hedley Brooke (1944- )</b>. Historiador de la ciencia británico. Brooke fue educado en la Universidad de Cambridge, donde se graduó en Ciencias Naturales y se doctoró con un trabajo sobre la historia de la química. Impartió junto con Geoffrey Cantor las "Gifford Lectures" en la Universidad de Glasgow en 1995. Fue nombrado primer profesor Andreas Idreos de Ciencia y Religión en la Universidad de Oxford en 1999, donde dirigió el Centro Ian Ramsey y fue miembro del Colegio Harris Manchester, Oxford.</p>
<p><b>Geoffrey Cantor (1943- )</b>. Profesor Emérito de Historia de la Ciencia en la Universidad de Leeds. Físico-radiofísico en el King's College de Londres. Departamento de Filosofía e Historia de la Ciencia de la Universidad de Indiana. Reconstruir la naturaleza: la participación de la Ciencia y de la Religión.</p>
<p><b>Fern Elsdon-Baker</b>. Profesora de Ciencias, Conocimiento y Creencia en la Sociedad. Directora Instituto de Investigación en Ciencia, Tecnología, Ingeniería, Matemáticas y Medicina (STEMM), Universidad de Birmingham. Investigadora transdisciplinar cuyo trabajo es predominantemente sociológico, histórico, filosófico y psicológico.</p>
<p><b>Peter Harrison (1955- )</b>. Director del Instituto para Estudios Avanzados en Humanidades en la Universidad de Queensland. Queensland.</p>
<p><b>Bernard Lightman (1950- )</b>. Canadiense. Editor de Isis. Fellow de la Royal Society de Canadá. Universidad de York (Toronto).</p>
<p><b>David Noel Livingstone (1953- )</b>. Profesor de Geografía e Historia Intelectual en la Universidad de Madison (WI).</p>
<p><b>Ronald Numbers (1942- )</b>. Historiador estadounidense de la ciencia. La Sociedad de Historia de la Ciencia le otorgó la Medalla George Sarton de 2008 por "una vida de logros académicos excepcionales como erudito distinguido". Madison Hilldale y William Coleman Profesor de Historia de la Ciencia y la Medicina en la Universidad de Wisconsin-Madison.</p>

**TABLA 11**

**SOCIÓLOGOS EN EL CAMPO DE LA RELIGIÓN Y CIENCIA**

**Tom Aechtner.** Profesor Titular de Religión y Ciencia en la Escuela de Investigación Filosófica e Histórica de la Universidad de Queensland.

**Elaine Ecklund.** Herbert S. Autrey Catedrático de Ciencias Sociales y Profesor de Sociología en el Departamento de Sociología de la Universidad de Rice, director del Programa de Religión y Vida Pública en el Instituto de Investigación de Ciencias Sociales de Rice (Houston, TX). Directora del Instituto Boniuk para la Tolerancia Religiosa en Rice.

**TABLA 12  
CIENTÍFICOS IMPLICADOS EN EL CAMPO DE LA RELIGIÓN Y CIENCIA**

**Francisco José Ayala Pereda (1934-2023).** Biólogo español, nacionalizado también estadounidense. Ex-dominico. Doctorado por la Universidad de Columbia. Viticultor. Universidad de California en Davis. Especialista en biología evolutiva.

**Rafael Bachiller García (1957- ).** Astrónomo y divulgador. Real Academia de Doctores de España. Director del Observatorio Astronómico Nacional del Real Observatorio Astronómico de Madrid.

**Ian Graeme Barbour (1923-2013).** Físico, teólogo, escritor. Premio Templeton 1999 para el Progreso de la Religión. Winifred Atherton Bean y profesor Emérito de Ciencia, Tecnología y Sociedad en Carleton College en Northfield, Minnesota.

**Celia-Deane-Drummond (1956- ).** Director del Instituto de Investigación Laudato Si' e investigador sénior en teología en Campion Hall, Universidad de Oxford. Profesor de Teología en la Universidad de Notre Dame de 2011-2019. Enseña teología sistemática en relación con las ciencias biológicas, especialmente evolución, ecología, genética; bioética, especialmente la sostenibilidad, la ecoteología y la teología pública. En 1980 recibió su doctorado en fisiología vegetal en la Universidad de Reading (Notre-Dame).

**Pablo D'Ors (1963- ).** Sacerdote católico y escritor español. Nieto del ensayista y crítico de arte Eugenio d'Ors. Tesis: "Teopoética Teología de la Experiencia Literaria". Asociación "Amigos del Desierto". Consejero del Pontificio Consejo de Cultura.

**John Carson Lennox (1943- ).** Matemáticas y Filosofía de la Ciencia en el Green Templeton College. Apologista cristiano; religión protestante evangélica. Formado en la Universidad de Cambridge. Álgebra (Teoría de Grupos). Interesado en las relaciones entre Ciencia, Filosofía y Teología.

**Alister McGrath (1953- ).** Biofísico. Teólogo de Irlanda del Norte, sacerdote anglicano, historiador intelectual, científico, apologista cristiano e intelectual público. Actualmente ocupa la Cátedra Andreas Idreos en Ciencia y Religión en la Facultad de Teología y Religión (Oxford).

**Arthur Peacocke (1924-2006).** Químico de Oxford. Decano del Clare College en la Universidad de Cambridge. Pionero en la investigación de los principios de la química física del ADN. Teólogo británico, bioquímico y sacerdote anglicano: la ciencia y la religión no sólo son enfoques conciliables sino complementarios.

TABLA 12 (CONTINUACIÓN)

<p><b>John Polkinghorne (1930-2021).</b> Físico y sacerdote anglicano británico, presidente de Queens' College, de la Universidad de Cambridge, y exprofesor de Física Matemática en Cambridge físico y sacerdote anglicano británico, presidente de Queens' College, de la Universidad de Cambridge, y exprofesor de Física Matemática en Cambridge</p>
<p><b>Javier Sánchez Cañizares (1970- ).</b> Cordobés. Físico y teólogo español. Dirige actualmente el Grupo Ciencia, Razón y Fe de la Universidad de Navarra. Ha sido galardonado en 2018 con el Premio Razón Abierta en la categoría de investigación (Pamplona).</p>
<p><b>Agustín Udías Vallina (1935- ).</b> Jesuita, Catedrático Emérito de Geofísica de la Universidad Complutense de Madrid.</p>
<p><b>Carlos Valiente Barroso.</b> Centro Universitario Villanueva, Universidad Complutense de Madrid, Director del Instituto Clínico de Investigación Interdisciplinar en Neurociencias (ICIIN). Tratamiento neuropsicológico mediante realidad virtual o el estudio de los beneficios clínicos de la espiritualidad.</p>
<p><b>Claudia E. Vanney (1966- ).</b> Doctora en Física por la Universidad de Buenos Aires y doctora en Filosofía por la Universidad de Navarra, y actualmente dirige el Instituto de Filosofía de la Universidad Austral (Argentina).</p>
<p><b>Rafael Vicuña (1949- ).</b> Departamento de Genética Molecular y Microbiología. Pontificia Universidad Católica de Santiago de Chile. Pontificia Academia de las Ciencias (2000).</p>

Algunos de los teólogos, filósofos, historiadores, científicos y sociólogos (e.g. Figs. 3 y 4) han sido merecedores del Premio Templeton (Wikipedia, n.d.) y/o participantes en las Gifford Lectures (Haldane, 2007; Wikipedia, n.d.), Conferences Terry (Wikipedia, n.d.) o Boyle Lectures (Wikipedia, n.d.) (Tabla 13 y Fig. 5). Existen Sociedades Científicas versadas en Religión y Ciencia o en Ciencia y Religión que organizan sus Congresos y Conferencias (Tabla 14). Existen asociaciones de ateos (Tabla 15), con sus propios órganos de difusión que también organizan sus Congresos y actividades (Tabla 16). Un par de frases en una u otra dirección. La primera es atribuida a Werner Heisenberg (1971-1976), Premio Nobel de Física en 1932: “El primer trago del vaso de las ciencias naturales te hará ateo, pero en el fondo del vaso te espera Dios”. La segunda, va en dirección contraria: “Cuando una persona sufre un delirio se llama locura. Cuando muchas personas sufren de un delirio se llama religión” (Robert Maynard Pirsig (1928-2017), escritor estadounidense/ Richard Dawkins (1946- ) biólogo evolutivo británico y divulgador de la ciencia). En la Fig. 6 se muestran los abanderados del ateísmo moderno.



**TABLA 13**  
**CONFERENCIAS SOBRE RELIGIÓN Y CIENCIA**

<p><b>Premio Templeton (1972).</b> Empresario estadounidense de origen británico. Se otorga a los personajes que contribuyen a la investigación o los descubrimientos de realidades espirituales. La dotación se ajusta cada año para que su montante supere al del Premio Nobel. Es el mayor premio otorgado en base al mérito espiritual.</p>
<p><b>Gifford Lectures (1888).</b> Patrocinan conferencias para “promover y difundir el estudio de la Teología Natural en el sentido amplio del término – en otras palabras, el conocimiento de Dios (Edimburgo, Glasgow, Aberdeen y St. Andrews). Lord Adam Gifford (1820-1887), senador de la Escuela Superior de Justicia de Escocia.</p>
<p>El <b>Dwight H. Terry Lectureship</b>, también conocido como <b>Terry Lectures</b>, se estableció en la Universidad de Yale en 1905 gracias a una donación de Dwight H. Terry de Bridgeport, Connecticut. Su propósito es involucrar tanto a los académicos como al público en una consideración de la religión desde un punto de vista humanitario, a la luz de la ciencia y la filosofía modernas. Históricamente, el tema ha sido similar al de las Conferencias Gifford en Escocia.</p>
<p><b>Boyle Lectures (1692/ 2004).</b> Bajo los términos de su testamento Robert Boyle dotó una serie de conferencias o sermones (originalmente ocho cada año) que debían considerar la relación entre el cristianismo y la nueva filosofía natural (la “ciencia” de hoy) que entonces emergía en la Sociedad europea.</p>

**FIGURA 3**  
**EXPERTOS EN EL CAMPO DE LA CIENCIA Y RELIGIÓN (I)**



FIGURA 3 (CONTINUACIÓN)

**YouTube**









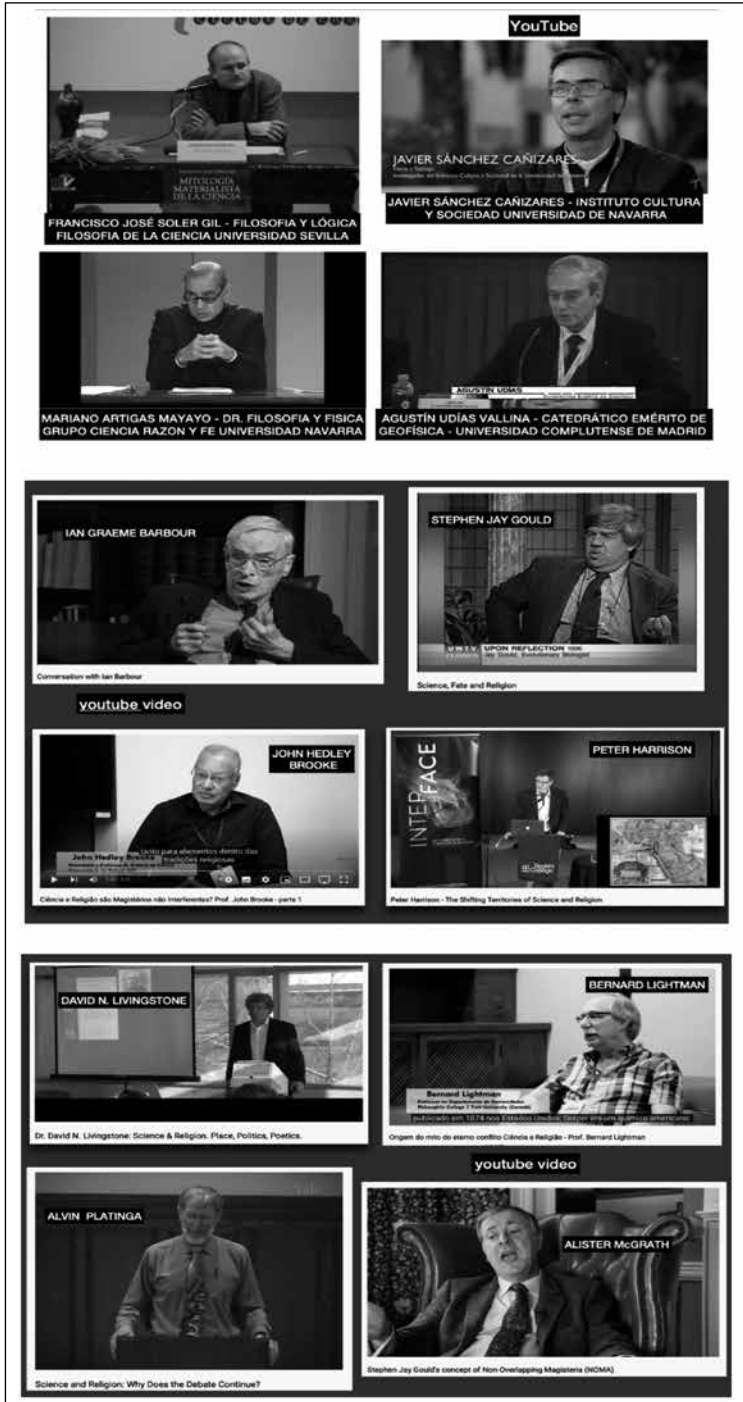
 <p><b>ELAINE HOWARD ECKLUND</b> HERBERT S. AUTREY CHAIR IN SOCIAL SCIENCES PROFESSOR OF SOCIOLOGY - RICE UNIVERSITY</p>	 <p><b>Dra. Claudia Vanney</b> Universidad Austral</p> <p><b>CLAUDIA VANNEY (1966- ) - DRA. FÍSICA - DIRECTORA INSTITUTO DE FILOSOFÍA UNIVERSIDAD AUSTRAL - ARGENTINA</b></p>
 <p><b>Dr. Celia Deane-Drummond</b> University of Notre Dame</p> <p><b>CELIA DEANE-DRUMMOND (1956- ) - DIRECTOR OF LAUDATIO SI' RESEARCH INSTITUTE - FACULTY OF THEOLOGY AND RELIGION - UNIVERSITY OF OXFORD</b></p>	 <p><b>MARGARET MORRISON (1954-2021)</b> CANADIAN PHILOSOPHER - PHILOSOPHY OF SCIENCE</p>
<b>YouTube</b>	
 <p><b>Noreen Herzfeld</b> Associate Professor of Science and Religion College of Saint Benedict &amp; Saint John's University</p> <p><b>NOREEN HERZFELD - COLLEGE OF ST. BENEDICT - SAINT JOHN'S UNIVERSITY - MINNESOTA</b></p>	 <p><b>MENON SANGEETHA - NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED STUDIES - BENGALURU - INDIA</b></p>
 <p><b>Dr. Ignacio Silva</b> Member of the Philosophy Institute of the National Council of Scientific Research Ph.D. in Theology - University of Navarra (1997)</p> <p><i>... não limitam a perspectiva e o campo de estudo, de uma maneira formal.</i></p> <p><b>IGNACIO SILVA - PROFESOR TEOLOGIA Y CIENCIAS INSTITUTO FILOSOFIA UNIVERSIDAD AUSTRAL</b></p>	 <p><b>JUAN ARANA</b> Catedrático Filosofía de la Naturaleza, Universidad Sevilla</p> <p><b>JUAN ARANA PROFESOR EMERITO FILOSOFÍA DE LA NATURALEZA UNIVERSIDAD DE SEVILLA</b></p>

FIGURA 4  
EXPERTOS EN EL CAMPO DE LA CIENCIA Y RELIGIÓN (II)



**FIGURA 5**  
**ALGUNOS DE LOS GANADORES DE LOS PREMIOS TEMPLETON, GIFFORD LECTURES,**  
**CONFERENCIAS TERRY Y CONFERENCIAS BOYLE**

Premio Templeton	Gifford Lectures	Conferencias Terry	Conferencias Boyle
Thomas F. Torrance (1978)	Ian Graene Barbour (1989-91)	Stephen Jay Gould (1985-86)	John F. Haught (2004)
Ian Graene Barbour (1999)	Alistair McGrath (2009)	John Polkinghorne (1996-97)	Philips Clayton (2006)
Arthur Peacocke (2001)	Sarah Coakley (2012)	Francisco J. Ayala (2001)	John Polkinghorne (2009)
John C. Polkinghorne (2002)	David Livingstone (2014)	Ronald L. Numbers (2006)	Geoffrey Cantor (2010)
Francisco J. Ayala (2010)	John Polkinghorne (1993-94)	Alvin Plantinga (2006)	Celia Deane-Drummond (2012)
Francis Collins (2020)	Peter Harrison (2010-2011)		John Polkinghorne (2013)
	Elaine Howard Ecklund (2017-18)		Alistair McGrath (2014)
	Geoffrey Cantor/ John Headley Brooke (1995-96)		
	Arthur Peacocke (1992-93)		
	Alvin Plantinga (2004-2005)		

**Gifford Lectures: secuencialmente Aberdeen, Edinburgh, Glasgow y St. Andrews**

**FIGURA 6**  
**ABANDERADOS DEL MODERNO ATEÍSMO**



**TABLA 14**  
**CONGRESOS Y CONFERENCIAS DE ASOCIACIONES CIENCIA/ RELIGIÓN/ TEOLOGÍA**

4-8 Mayo (Ålesund, Norway) European Conference on Science and Theology (ECST XIX)
16-17 Mayo (Sydney, Australia) International Conference on Science Religion and Philosophy Studies (ICRPS)
26-28 Mayo (Birmingham, Reino Unido) The Science and Religion Forum (SRF)
29-30 Junio (Online) International Multidisciplinary Scientific Conference on the Dialogue between Sciences & Arts, Religion & Education
13 Julio (Universidad de Birmingham) The International Research Network for the Study of Science and Belief in Society, 3 <sup>rd</sup> Annual Conference.

**TABLA 15**  
**ASOCIACIONES DE ATEOS Y LIBREPENSADORES**

AEAL – Asociación Española de Ateos y Librepensadores “South Place Ethical Society” (Londres) -comunidad librepensadora que data de 1793.
American Atheists
Asociación Madrileña de Ateos y Librepensadores
Atheist Alliance International
European Humanist Federation
International Humanist and Ethical Union (IHEU)
International League of non-religious and atheist
The Skeptics Society (1992), creada en Los Ángeles, primero a nivel nacional y luego internacional

**TABLA 16**  
**CONGRESOS DE ATEOS**

International Conference on Atheism and Secularism (15 Abril, Atlanta, Georgia)
International Conference on Atheism ICA 2022 (2-3 Junio, New York)
International Conference on Atheism and Atheology ICAA 2023 (22-23 Abril, Tokyo)

### ***DEFINICIÓN DE CIENCIA Y RELIGION***

La ciencia como la religión son elementos esenciales de la cultura y su mutua relación ha estado siempre marcada por la complejidad, al menos desde el surgimiento de la ciencia moderna (Brooke, 2016; Brooke, 2014; Brooke 2012; Brooke y Cantor, 2000; Ferngren, 2002; Shapin, 2008). He aquí algunos términos a tener en cuenta:

- Coexistencia: existencia de una cosa a la vez que otra u otras
- Complementario: que sirve para completar o perfeccionar algo
- Convergencia: coincidir con la misma posición ante algo controvertido
- Conflicto: problema, cuestión, materia de discusión.

Podríamos decir coexistencia (no intersección), complementario (intersección) (Johnson et al., n.d.; Tucker e Ivakhiv, convergencia (solapamiento) y conflicto (oposición).

El problema de la nomenclatura no es baladí. Distintas disciplinas se refieren a la realidad de distintas maneras (Arana, 2020); Arana, 2015; Arana 2007a, Arana, 2007b), como indica el filósofo Juan Arana (1950- ), participante en este Ciclo de Conferencias de la RASC. En opinión de Paul Maurice Adrien Dirac (1902-1984), casi el 90% de los debates y desacuerdos provienen a causa de una falta de conocimiento o imperfección de la terminología perteneciente al problema objeto de la discusión. Carl Nilsson Linnaeus (1707-1787) aseveraba “Nomina si nescis, perit et cognitio rerum” (1775); si ignoras el nombre de las cosas, desaparece también lo que sabes de ellas.

Como afirma el Proverbio Chino: “The beginning of all wisdom is to call things by their right name”. Antonine Laurent Lavoisier (1743-1794), al final del Capítulo V de su “Tratado Elemental de Química, acude al Abate de Condillac (1714-1780), para enfatizar la importancia del lenguaje: “Pero en fin, las ciencias han progresado más porque los sabios han realizado mejor sus observaciones y se han expresado con la misma precisión y exactitud que pusieron en ellas, y de este modo, corrigiendo la lengua, han razonado mejor”.

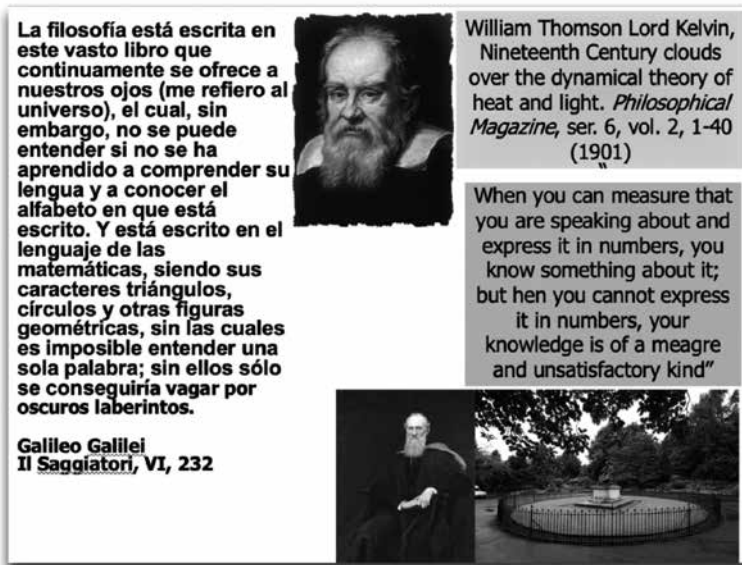
La primera acepción del diccionario de la Real Academia Española define la ciencia como conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación y el razonamiento, sistemáticamente estructurados y de los que se deducen principios y leyes generales con capacidad predictiva y comprobables experimentalmente. Galileo Galilei (1564-1642) en *Il Saggiatori* (1623), VI, 232 indica (Fig. 7): “La filosofía está escrita en este vasto libro que continuamente se ofrece a nuestros ojos (me refiero al universo), el cual, sin embargo, no se puede entender si no se ha aprendido a comprender su lengua y a conocer el alfabeto en que está escrito. Y está escrito en el lenguaje de las matemáticas, siendo sus caracteres triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es imposible entender una sola palabra; sin ellos solo se conseguiría vagar por oscuros laberintos”.

La definición de ciencia puede ser tan exigente nos propongamos. Galileo Galilei en “*Il Saggiatori*” no habla de ciencia, sino de filosofía. La ciencia es un invento posterior (siglo XIX). Antes se denominaba filosofía natural o filosofía experimental. William Whewell (1794-1886) estandarizó en 1834 el término científico para referirse a los practicantes de las diversas filosofías naturales. Whewell, erudito, director del “Trinity College”, miembro de la “Royal Society” y miembro fundador de la “British Association for the Advancement of Science”, y que clasificó a la teología natural entre las ciencias inductivas.

Johannes Kepler (1571-1630) (Fig. 8) podría haber hablado por muchos de su tiempo cuando describía su trabajo como “thinking God’s thoughts after him” (Cain Travis, 2022; Lawrynowicz y Polatoglou, 2013). Immanuel Kant (1724-1804) había realizado

una clasificación de las ciencias en duras y blandas. Benjamín Jeremías Richter (1762-1807), uno de los introductores de la estequiometría, era discípulo de Kant. Surgen más adelante las complicaciones en las distintas ciencias si nos empeñamos en hablar de certezas, e.g. D'Arcy Wentworth Thompson (1860-1948), biólogo y matemático escocés, en la introducción de “Crecimiento y Forma” (Fig. 9), publicado en 1917, en la que alude a Emil du Bois Reymond (1818-1896). Jacobus Henricus Van't Hoff (1852-1911), Premio Nobel de Química en 1901, aboga en 1908 por el papel de la imaginación en las relaciones causa efecto en adición al de la observación (Benfey, 1960).

FIGURA 7  
FRASES FAMOSAS DE GALILEO Y LORD KELVIN



Según el diccionario de la Real Academia Española se denomina religión a un conjunto de creencias o dogmas acerca de la divinidad, de sentimientos de veneración y temor hacia ella, de normas morales para la conducta individual y social y de prácticas rituales, principalmente la oración y el sacrificio para darle culto. “Ciencia” y “religión” no son términos inmutables con significados inequívocos. De hecho, son términos acuñados recientemente, con significados variables según épocas y culturas. Antes del siglo XIX, el término “religión” estaba rara vez en uso (De Cruz, 2002; De Cruz, 2021b; Vanney y Silva, 2019)

Para autores medievales, como Santo Tomás de Aquino, el término religión significaba piedad o culto. Era una virtud moral intrínseca al hombre mediante la cual se perfeccionan principalmente los actos internos de devoción y oración. Para los modernos post reforma protestante, en cambio, la idea de religión se refiere principalmente a un sistema de creencias proposicional y de prácticas rituales (Vanney y Silva, 2019).

FIGURA 8  
FRASES FAMOSAS DE KEPLER, KANT Y THOM




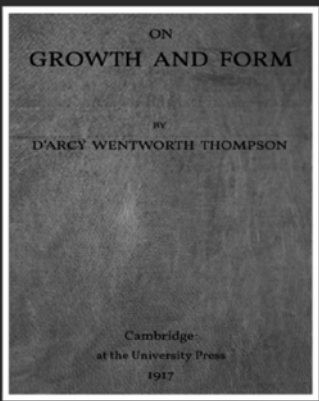
<b>Donde hay materia, hay geometría</b>	<b>Johannes Kepler (1571-1630)</b> Of the chemistry of his day and generation, Kant declared that it was a science, but not Science - <i>eine Wissenschaft, aber nicht Wissenschaft</i> - for that the criterion of true science lay in its relation to mathematics.	<b>Comprender quiere decir, pues, ante todo, geometrizar.</b>
	This was an old story: for Roger Bacon had called mathematics <i>porta et clavis scientiarum</i> , and Leonardo da Vinci had said much the same.	
	<b>René THOM (1923-2002), padre de la teoría de las catástrofes, hoy parte de la teoría del caos</b>	"Prefiero el campo de la matemática en el que no se sabe muy bien qué se hace", en el que las fronteras son móviles y abiertas, y en el que hay una zona del conocimiento "en la que aún se puede experimentar maravillas".

FIGURA 9  
INTRODUCCIÓN DE SOBRE EL CRECIMIENTO Y LA FORMA DE D'ARCY THOMPSON

	<p><i>Emil du Bois Reymond (1818-1896), "chemistry would only reach the rank of science, in the high and strict sense, when it should be found possible to explain chemical reactions in the light of their causal relations to the velocities, tensions and conditions of equilibrium of the constituent molecules; that, in short, the chemistry of the future must deal with molecular mechanics by the methods and in the strict language of mathematics, as the astronomy of Newton and Laplace dealt with the stars in their courses.</i></p> <p>We know how great a step was made towards this distant goal as Kant defined it, when van't Hoff laid the firm foundations of a mathematical chemistry, and earned his proud epitaph - <i>Physicam chemiae adiunxit</i>.</p>
---	--



La ciencia era una virtud intelectual que perfeccionaba al hombre en particular. Además, como se la consideraba desde la filosofía aristotélica no involucraba ni experimentos controlados ni una modelización matemática de los fenómenos observados. El término “religión” obtiene su significado actual mucho más amplio a partir de los trabajos de los primeros antropólogos, como Edward Burnett Tylor (1832-1917), quien en 1871 usa sistemáticamente el término para las religiones de todo el mundo (De Cruz, 2017). Para los modernos del siglo XVII la ciencia implicaba el perfeccionamiento moral de quien la ejercía y conducía al conocimiento de Dios (Osler, 1998). Pero a diferencia de los medievales, la experimentación y la modelización matemática eran esenciales al conocimiento natural.

Bede el venerable (672-735) era un monje benedictino Northumbrio, del monasterio de Saint Peter (Wearmouth), escritor, maestro y erudito, lingüista y traductor, que al pasar las obras al inglés fomenta el cristianismo. En 1899 Giacchino Vincenzo Raffaello Luigi Pecci (1810-1903), León XIII, lo declaró Doctor de la Iglesia, siendo el único nativo de Gran Bretaña en lograr tal designación, ya que Anselmo de Canterbury (1033-1109), también Doctor de la Iglesia, era originario de Italia, Aosta (Longobardia). La Tumba del venerable Bede se encuentra (Fig. 10) en la Capilla Galileo de la Catedral de Durham. Bede es autor de “De Natura Rerum”, “De la naturaleza de las cosas” (Bede, 2010), un libro motivado por la convicción del autor de que es importante para la Iglesia enseñar cómo funciona la naturaleza para que el pueblo sea menos temeroso de ella (McLeish, 2018).

**FIGURA 10**  
**BEDE EL VENERABLE (672-735) Y “DE RERUM NATURA”**



El naturalismo metodológico (principio epistemológico que limita la investigación científica a las entidades y leyes naturales) explícito surge en el siglo XIX, con el X-Club, un grupo de presión para la profesionalización de la ciencia fundado en 1864 por Thomas Huxley (1825-1895) y amigos, cuyo objetivo era promover una ciencia libre de dogmas religiosos. Así en el transcurso de la historia, las nociones de ciencia y de religión salen del interior del hombre y son puestas en el exterior, pasando de ser virtudes a actividades (De Cruz, 2017; Vanney y Silva, 2019).

El conjunto de creencias de una religión constituye la fe. Ciencia y Religión tiene un carácter más universal (Vanney y Silva, 2019). En ciertos ámbitos cristianos se utiliza el de Ciencia y Fe (Yegge, 2014). Fe y Razón se utiliza en el mundo católico, e.g. la encíclica Fides et Ratio de Juan Pablo II. Incluye el diálogo no solo con la ciencia, sino con todo el discurso racional.

Este tema, la fe y la razón lo he tratado de forma breve (Asuero, 2015) en el Boletín de la Hermandad de los Estudiantes Enero 2015 en Guión de Farmacia: en la contribución “El espejo de la diversidad”. Teología y Ciencia en diversas confesiones para remarcar el carácter académico del discurso, existiendo variadas revistas incluyendo el nombre. En la Fig. 11 se muestra una selección de científicos cristianos.

**FIGURA 11**  
**CIENTÍFICOS CRISTIANOS ENTRE LOS QUE APARECEN 12 PREMIOS NOBEL DE FÍSICA,**  
**6 PREMIOS NOBEL DE MEDICINA, Y 3 PREMIOS NOBEL DE QUÍMICA.**

<b>CIENTÍFICOS CRISTIANOS</b>	<b>Erwing Schrödinger (1887-1961)</b>	<b>Karl Landsteiner (1868-1943)</b>
	<b>Louis Pasteur (1822-1895)</b>	<b>Peter Grünberg (1939- )</b>
	<b>Georges Lemaître (1894-1966)</b>	<b>Clyde Cowan (1919-1974)</b>
	<b>Jérome Lejeune (1926-1994)</b>	<b>Victor Francis Hess (1833-1964)</b>
	<b>Gregor Mendel (1822-1884)</b>	<b>Henri Becquerel (1852-1908)</b>
	<b>Nikola Tesla (1856-1943)</b>	<b>Joseph John Thomson (1856-1940)</b>
	<b>Alexander Fleming (1881-1955)</b>	<b>Richard Smalley (1943-2005)</b>
	<b>Guillermo Marconi (1874-1937)</b>	<b>Robert Andrews Millikan (1868-1953)</b>
	<b>Santiago Ramón y Cajal (1852-1934)</b>	<b>Max Born (1882-1970)</b>
	<b>Gerty Cori (1896-1957)</b>	<b>George Hevesy (1885-1966)</b>
	<b>Eric Wieschaus (1947- )</b>	<b>Niels Bohr (1885-1965)</b>
	<b>Max Planck (1858-1947)</b>	<b>Brian Kobilka (1955)</b>
	<b>Alexis Carrel (1873-1944)</b>	<b>Carlo Rubbia (1934- )</b>
	<b>Werner Heisenberg (1901-1976)</b>	<b>Albert Claude (1899-1983)</b>

## **RELIGIÓN Y CIENCIA EN LA PRENSA Y EN REVISTAS CIENTÍFICAS: UN PUPURRÍ**

El tema objeto de la Conferencia despierta un gran interés en la prensa, incluida la digital, con comentarios en la misma dirección:

- El gran problema en el diálogo entre la ciencia y la religión es el lenguaje dice Javier Sánchez Cañizares (físico y teólogo español que dirige el Grupo Ciencia, Razón y Fe de la Universidad de Navarra) (Vida Nueva Digital, 2020).
- Ciencia y fe son absolutamente compatibles (Vida Académica, n.d.; Carlos Valiente, 2015).
- Es un error suponer que la ciencia y la fe son incompatibles (Azumendi, 2017)
- Humanismos y científicos defienden el dialogo entre la ciencia y la religión para alcanzar un entendimiento (Jornadas organizadas por el CSIC y la Asociación Española para el avance de la ciencia) (Europa Press Sociedad, 2020).
- Ciencia y religión ¿son compatibles? (Ayala, 2017).
- científicos y premios Nobel cristianos (Dimitrov, 2010).
- 100 eminentes científicos cristianos que cambiaron el mundo (Aprendemos de las religiones, 2019).
- Entre la ciencia y la religión ¿hay sitio para Dios? (Rodríguez Petersen, 2019).
- ¿Pueden los científicos prescindir de Dios? (Alpert, 2019).

O en direcciones son contrapuestas:

- Por qué la religión y la ciencia no van de la mano (Trejo Bastidas, 2018).
- religión y ciencia una batalla irresoluble (Griera, n.d.).
- Hay un conflicto inevitable entre ciencia y religión afirma Alan Sokal en la Residencia de Estudiantes (Mediavilla, 2017).
- Los hombres se inventan a los dioses para no mirar la realidad (Marti, 2006)
- Roger Kornberg (1947- ), Premio Nobel de Química, la gente se resiste a la idea, pero la vida es solo química (Ansede, 2019).

Aquí hay opiniones mixtas:

- Reflexiones sobre la relación entre la ciencia y la fe (Espinosa Cifuentes, 2001)
- Ciencia y religión ¿la historia de un conflicto? (Ferragud y Florensa, 2021)
- Un debate que sigue vivo (Prieto Santana, n.d.)
- Científicos famosos contra Dios y la Religión (Giberson y Artigas, 2012)
- Ideas de dios y de la religión de 5 grandes científicos de la historia (BBC News Mundo, 2019)
- Ciencia y religión tan cerca y tan lejos (Franco Vélez, 2018)

El debate en la prensa es un reflejo de lo que ocurre en las revistas científicas, por ejemplo, “Physics Today”

- Ciencia y religión, el debate continúa (Matthews, 2007; Morrison, 2007).
- Dominios separados (Kalman, 2013).
- Incompatibilidad de ciencia y religión (Schneck, 2008).
- Pensando de forma diferente (McLeish, 2018).
- Para algunas cuestiones la ciencia no tiene respuesta (Alexanian, 2014).
- Los científicos pueden golpear en la puerta del cielo (Schofield, 2012; Dilworth, 2013).
- Dirigiendo al público hacia la ciencia y la religión (Peshkin, 2006).

Los trabajos de revistas de la especialidad, algunos de autores tan significativos como nuestro colega Juan Arana (Universidad de Sevilla), William Bainbridge, de la “National Science Foundation”, Elaine Ecklund de la Universidad de Rice, o Denis Alexander, del Instituto Faraday de Ciencia y Religión de la Universidad de Cambridge, contemplan títulos como tales:

- Interacción, relación y debate entre la ciencia y la religión (Aragon, 2017).
- Influencia de la religión en la ciencia (Romero, 2016).
- La ciencia frente a las creencias religiosas (Aguilera Mochón, 2005).
- Filosofía, Ciencia y Fe en el debate contemporáneo (Remolina Vargas, 2009).
- Análisis de la razón versus la fe (Vázquez Vaamonde, 2011).
- Preguntas y respuestas en relación con la fe (Solano, 2018).
- Conflicto entre científicos académicos (Ecklund, 2009).
- Más allá del conflicto epistemológico narrativo (Evans y Evans, 2008).
- Modelos de relación (Alexander, 2011).
- El eterno debate entre ciencia y religión (Díaz, n.d.; Prieto Santana, n.d.; Sánchez Cañizares, 2010).
- Religión y ciencia (Bainbridge, 2004).
- Repensando la relación entre religión y ciencia (Nieto y Granwell, 2015).
- Ciencia y religión un debate que sigue vivo (Prieto Santana, n.d.).
- Filosofía de la religión y el giro científico (Vidala y Vanio, 2018).
- El debate entre religión y ciencia en la actualidad (Caamaño López, 2019).
- Popper sobre ciencia y religión (Barzaghi y Corcó, 2016).
- Religión y ciencia en el pensamiento de Albert Einstein (Daros, 2002).
- ¿cómo son las relaciones entre la fe y la ciencia en la actualidad (Giménez Amaya, n.d.).

Algunas obras clásicas sobre ciencia y religión, anteriores a la irrupción actual de numerosas obras en el campo, que pueden formar parte de una biblioteca básica de iniciación al tema se muestran en las Figuras 12 y 13.

FIGURA 12  
OBRAS CLÁSICAS SELECCIONADAS SOBRE CIENCIA Y RELIGIÓN (I)



FIGURA 13  
OBRAS CLÁSICAS SELECCIONADAS SOBRE CIENCIA Y RELIGIÓN (II)



**DIOS EN LA FÍSICA, LA FILOSOFÍA, LA LITERATURA Y LA POESÍA**

Ludwig Boltzman (1844-1906) en el Tratado sobre el Electromagnetismo de James Clerk Maxwell (1831-1879), y en referencia a las famosas ecuaciones de éste último (Fig. 14) anota a pie de página un aforismo de Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832) (Fig. 15), dramaturgo, novelista, poeta y naturalista alemán: “War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb, die mir das innere Toben stillen, das arme Herz mit Freude füllen und mit geheimnisvollem Trieb die Kräfte der Natur rings um mich her enthüllen? (Goethe, 1888, p.42) ¿Fue un dios quien escribió estos signos (Andrade da Silva, 1959, p. 148; Belendez Vázquez y Arribas Garde, 2014; Hildebrand, 1988; Klein, 1904) que aquietan mi furor interior, llenan de alegría mi pobre corazón y revelan con misterioso impulso las fuerzas de la naturaleza que me rodean?

**FIGURA 14**  
**ECUACIONES DE MAXWELL**  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones\\_de\\_Maxwell](https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones_de_Maxwell)

En el vacío	En la materia
$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$
$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

**FIGURA 15**  
**JOHANN WOLFGANG VON GOETHE (1749-1832)**  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Johann\\_Wolfgang\\_von\\_Goethe](https://es.wikipedia.org/wiki/Johann_Wolfgang_von_Goethe)



Dios es el ser supremo que en las religiones monoteístas es considerado hacedor del universo (Acepción 1, RAE). Albert Einstein (1879-1955) en “Religión y Ciencia (New York Times, 1930) afirma: “¿Cómo se puede comunicar el sentimiento religioso cósmico de una persona a otra, si no puede dar lugar a una noción definida de un Dios ni a una teología? En mi opinión, la función más importante del arte y la ciencia es despertar este sentimiento y mantenerlo vivo en quienes son receptivos a él”. En “Nature” (Einstein, 1940): “Todos estos conflictos tienen su origen en errores fatales”. “Ahora bien, aunque los reinos de la religión y la ciencia en sí mismos están claramente separados entre sí, sin embargo, existen entre los dos fuertes relaciones recíprocas y dependencias.” “Un espíritu se manifiesta en las leyes del Universo, un espíritu muy superior al del hombre, y ante el cual nosotros, con nuestros modestos poderes, debemos sentirnos humildes. De esta manera, la búsqueda de la ciencia conduce a un sentimiento religioso de un tipo especial” (Einstein, 1954; Einstein, 1949). El sacerdote jesuita belga Georges Lemaitre (1894-1966), el primero en hablar del universo en expansión y de un pasado infinito (McCann, 2016), es padre del Big Ban (bautizado así algo despectivamente por Sir Fred Hoyle (1915-2001), del Instituto de Astronomía de Cambridge). Lemaitre no advierte conflicto (Fig. 16) entre ciencia y religión (y aún ciencia y fe) (Aikman, 1933; Lemaitre, 1931).

El texto que sigue pertenece a El Mito de Sísifo (1942, 1975), de Albert Camus (1913-1960) (Fig. 17), incluido al principio de “El Azar y la Necesidad” (1970), de Jacques Monod (1910-1976): “En ese instante sutil en que el hombre vuelve sobre su vida, Sísifo regresando a su roca contempla esa serie de actos inconexos que devienen su destino, creados por él, unido bajo la mirada de su memoria, y enseguida sellado por su muerte. Así, persuadido del origen completamente humano de todo lo que es humano, ciego que desea ver y que sabe que la noche no tiene fin, está siempre en marcha. La roca todavía rueda. ¡Abandono a Sísifo al pie de la montaña! Siempre torna a encontrar su fardo! Mas Sísifo enseña la fidelidad superior que niega los dioses y que conmueve las rocas. El mismo juzga que todo está bien. Ese universo en adelante sin dueño no le parece ni estéril ni fútil. Cada grano de esa roca, cada destello mineral de esa montaña plena de noche, para él forma un mundo. La propia lucha hasta la cumbre basta para henchir el corazón de un hombre. Hay que imaginar a Sísifo dichoso” (Camus, 1943, 1975).

Juan Ramón Jiménez (1881-1958) en *Lírica de una Atlántida*, prolegómenos de “Dios Deseante y Deseado/ Animal de Fondo” se expresa (Fig. 18) de la forma: “Es decir, que la evolución, la sucesión, el devenir de lo poético mío ha sido y es una sucesión de encuentro con una idea de dios. Al final de mi primera época, hacia mis 28 años, dios se me apareció como una mutua entrega sensitiva; al final de la segunda, cuando yo tenía unos 40 años, pasó dios por mí como un fenómeno intelectual, con acento de conquista mutua; ahora que entro en lo penúltimo de mi destinada época tercera, que supone las otras dos, se me atesora dios como un hallazgo, como una realidad de lo verdadero suficiente y justo. Si en la primera época fue éxtasis de amor, y en la segunda avidez de eternidad, en esta tercera es necesidad de conciencia interior y ambiente en lo limitado de nuestra conciencia de hombre...”.

FIGURA 16  
 GEORGES LEMAÎTRE (1894-1966): LA CIENCIA Y LA RELIGIÓN EN ARMONÍA

706 *NATURE* [MAY 9, 1931]

**The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory.**


SIR ARTHUR EDDINGTON states that, philosophically, the notion of a beginning of the present order of Nature is repugnant to him. I would rather be inclined to think that the present state of quantum theory suggests a beginning of the world very different from the present order of Nature. Thermodynamical principles from the point of view of quantum theory may be stated as follows: (1) Energy of constant total amount is distributed in discrete quanta. (2) The number of distinct quanta is ever increasing. If we go back in the course of time we must find fewer and fewer quanta, until we find all the energy of the universe packed in a few or even in a unique quantum.

G. LEMAÎTRE

**El sacerdote Georges Lemaître, el padre del Big Bang que hizo cambiar de opinión a Einstein**


El físico y matemático belga, que aunó ciencia y fe en sus trabajos, fue el primero que habló del origen del universo en expansión y con un pasado infinito

Alberto López 17 Jul 2018 - 20:46 CEST



Georges Henry Joseph Édouard Lemaître (1894-1966)


Sir Fred Hoyle (1915-2001)  
 Institute Astronomy (Cambridge)



**LEMAITRE FOLLOWS TWO PATHS TO TRUTH**

*The Famous Physicist, Who Is Also a Priest, Tells Why He Finds No Conflict Between Science and Religion*


**ABBE LEMAITRE'S TWO PATHS** The Famous Physicist Tells Why He Finds No Conflict Between Science and Religion



Georges Lemaître: the Priest Who Proposed the 'Big Bang'

Joseph McCann CM


Studies • volume 105 • number 418



Stephen William Hawking (1942-2018)

**The New York Times**

FIGURA 17  
 ALBERT CAMUS Y EL MITO DE SISIFO



Albert Camús (1913-1960)

Le Mythe de Sisyphé  
 1942


Albert Camus

**El mito de Sísifo**


Biblioteca clásica y contemporánea  
 Lusaada

I leave Sisyphus at the foot of the mountain! One always finds one's burden again. But Sisyphus teaches the higher fidelity that negates the gods and raises rocks. He too concludes that all is well. This universe henceforth without a master seems to him neither sterile nor futile. Each atom of that stone, each mineral flake of that night-filled mountain, in itself forms a world. The struggle itself toward the heights is enough to fill a man's heart. One must imagine Sisyphus happy.

THE MYTH OF SISYPHUS (Albert Camús)  
 Jacques Monod en "Chance and Necessity"




Jacques-Lucien Monod (1910-1976)



Jacques Monod  
**Le hasard et la nécessité**  
Essai sur le hasard biologique

Tout de qui existe dans l'univers est le fruit du hasard et de la nécessité

*Démocrite*



Museo de Bellas Artes de Lion

León Alexandre Delhomme (1841-1995)  
 Demócrito meditando sobre el alma humana



Xavier Zubiri (1898-1983) en *Naturaleza, Historia y Dios* (Zubiri, 2007) (Fig. 19): “A nadie se le oculta la gravedad suprema del problema de Dios. La posición del hombre en el universo, el sentido de la vida, de sus afanes y de su historia, se hallan inmensamente afectados por la actitud del hombre ante este problema. Ante él pueden tomarse actitudes no solamente positivas, sino también negativas; pero en cualquier caso el hombre viene íntimamente afectado por ellas. Porque si bien es cierto que en la ciencia pasa todo como si no hubiera Dios, no es menos cierto que si no hubiera Dios no pasaría nada. Y es que la realidad de Dios, aunque por un lado sea la más lejana de las realidades, es también, por otro, la más próxima de todas ellas.”

En *Poetas Turcos contemporáneos* (Ed. Adonáis, 1959) (Fig. 19): “Escuchad; vosotros que corréis pisoteando a vuestro Dios/ Las últimas campanadas de las iglesias/ Los últimos cantos de las mezquitas/ Mendigan la piedad para el último Dios que queda.”

### **TESTIMONIOS A FAVOR Y EN CONTRA**


En la Universidad de Miami, se crea en 2016, en una ceremonia de carácter íntimo, la Cátedra Appignani de Ateísmo, Humanismo y Ética Secular (Fig. 20). Louis Appignani (1933- ), hombre de negocios retirado, benefactor (dona 2,4 millones de dólares a tal fin) flanquea junto con su mujer, en la presentación, a Richard Dawkins, uno de los cuatro jinetes del nuevo ateísmo (Ruse, 2022).

En el libro de Francis Crick (1916-2004), Nobel de Medicina o Fisiología en 1962 “La hipótesis asombrosa: la búsqueda científica del alma” (Crick, 1994; Siegel y Callaway, 2004), se recoge (Fig. 21): “Tú, tus alegrías y tus penas, tus recuerdos y tus ambiciones, tu sentido de identidad personal y libre albedrío, no son de hecho más que el comportamiento de un vasto conjunto de células nerviosas...” Los neurocientíficos suelen explicar nuestros pensamientos en términos de estados cerebrales, no en referencia a un alma o espíritu inmaterial... (De Cruz, 2017).

Ramón Aparicio explica en un Proyecto sobre el análisis del proceso de olfacción del aceite de oliva virgen que los compuestos químicos son los responsables de las percepciones sensoriales. Incluye en su diapositiva una frase “Nada hay en el entendimiento que no haya pasado antes en los sentidos” (Nihil est intellectu quod prius non fuerit in sensu) que atribuye a Aristóteles, y que Guillaume François Rouelle (1703-1770) el Viejo, Maestro boticario, tenía puesta en su laboratorio, lo que había confirmado Cranefield (1970) en un trabajo publicado en el “Journal of Medicine and allied sciences.


Extraemos unas frases del trabajo de Arthur Kornberg (1918-2007) (Kornberg, 1989), Premio Nobel de Medicina o Fisiología junto con Severo Ochoa (1905-1993), publicado en “Biochemistry”, titulado: “De las dos culturas: la de la química y la de la biología” (Fig. 22): “El organismo humano, su forma y su conducta, están determinados por reacciones químicas discretas, al igual que su origen, interacciones con el medio y en determinados aspectos, su destino. El lenguaje de la química posee una gran belleza estética, liga las ciencias químicas a las biológicas y médicas, y permite comprender gran parte de la vida en términos racionales...”. “La genética, herencia y evolución, se

**FIGURA 18**  
**JUAN RAMÓN JIMÉNEZ: EL DEVENIR DE LO POÉTICO Y DIOS DESEANTE Y DESEADO**



**Juan Ramón Jiménez (1881-1958)**

**LÍRICA DE UNA ATLÁNTIDA.**  
 En el otro costado, Una colina meridiana.  
 Dios deseante y deseado. De los ríos que se van (1936-1954)  
 Galacia Guteber/Círculo de Lectores, pp 259-260



*Juan Ramón Jiménez*  
**LÍRICA DE UNA ATLÁNTIDA**  
 En el otro costado. Una colina meridiana.  
 Dios deseante y deseado. De los ríos que se van (1936-1954)  
 Galacia Guteber/Círculo de Lectores

**Juan Ramón Jiménez**  
 Dios deseado y deseante  
 (Animal de Fiebre)  
 EDICIÓN CRÍTICA Y PRONOMINAL A CARGO DE JOSÉ BLANQUER Y JOSÉ LUIS LÓPEZ

Es decir, que la evolución, la sucesión, el devenir de lo poético mío ha sido y es una sucesión de encuentro con una idea de dios. Al final de mi primera época, hacia mis 28 años, dios se me apareció como una mutua entrega sensitiva; al final de la segunda, cuando yo tenía unos 40 años, pasó dios por mí como un fenómeno intelectual, con acento de conquista mutua; ahora que entro en lo penúltimo de mi destinada época tercera, que supone las otras dos, se me atesora dios como un hallazgo, como una realidad de lo verdadero sufiente y justo. Si en la primera época fue éxtasis de amor, y en la segunda avidez de eternidad, en esta tercera es necesidad de conciencia interior y ambiente en lo limitado de nuestra conciencia de hombre...

**FIGURA 19**  
**TESTIMONIO DE EINSTEIN, ZUBIRI Y POETA TURCO CONTEMPORÁNEO**

"A spirit is manifest in the laws of the Universe – a spirit vastly superior to that of man, and one in the face of which we with our modest powers must feel humble. In this way the pursuit of science leads to a religious feeling of a special sort" (Albert Einstein)



**Albert Einstein (1879-1955)**

A nadie se le oculta la gravedad suprema del problema de Dios. La posición del hombre en el universo, el sentido de la vida, de sus afanes y de su historia, se hallan inmensamente afectados por la actitud del hombre ante este problema. Ante él pueden tomarse actitudes no solamente positivas, sino también negativas; pero en cualquier caso el hombre viene íntimamente afectado por ellas.

**Poetas Turcos Contemporáneos**  
 Ed. Adonais, 1959.

**Poetas Turcos Contemporáneos**  
 Ed. Adonais, 1959.

**DIOS en la poesía actual**  
 Muestra de poesía española e hispanoamericana  
 del INSTITUTO DE INVESTIGACIONES LINGÜÍSTICAS Y LINGÜÍSTICAS  
 de la UNIVERSIDAD DE SEVILLA

**Xavier Zubiri**  
**NATURALEZA HISTORIA DIOS**  
 Alianza Editorial  
 Fundador: Xavier Zubiri

Porque si bien es cierto que en la ciencia pasa todo como si no hubiera Dios, no es menos cierto que si no hubiera Dios no pasaría nada. Y es que la realidad de Dios, aunque por un lado sea la más lejana de las realidades, es también, por otro, la más próxima de todas ellas.

**Naturaleza, Historia, Dios**  
 Xabier Zubiri



**Xabier Zubiri (1898-1983)**

**DIOS EN LA POESÍA ACTUAL**  
 (Antología)  
 Muestra de poesía española e hispanoamericana  
 del INSTITUTO DE INVESTIGACIONES LINGÜÍSTICAS Y LINGÜÍSTICAS  
 de la UNIVERSIDAD DE SEVILLA

**FIGURA 20**  
**LOUIS APPIGNANI Y LA CÁTEDRA DE ATEISMO, HUMANISMO Y ÉTICA SECULAR (LAICA) DE LA UNIVERSIDAD DE MIAMI**



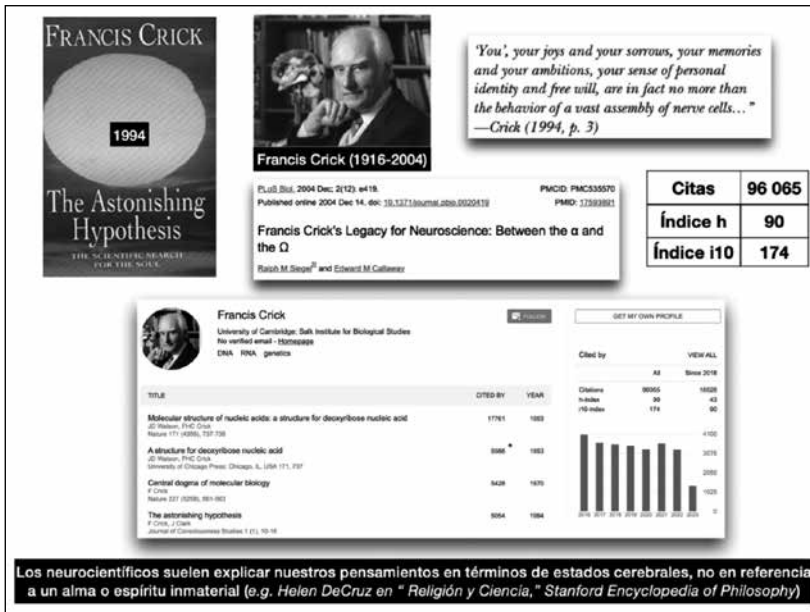
comprende y examina ahora en términos químicos simples...”. El comentario de Ochoa sobre Zubiri: “Zubiri y yo coincidíamos en casi todo, pero el veía a Dios en la creación de la materia. Yo no lo sé...”

Arthur Kornberg, en una reunión de la Academia Americana para el Avance de la Ciencia, en 1987: “Resulta asombroso que personas inteligentes y formadas, incluidos los médicos, sean reacias a creer que la mente, como parte de la vida, es materia y sólo materia”. Para Arthur Compton (1892-1962), Premio Nobel de Física en 1927, en cambio: “No puede haber un conflicto entre ciencia y religión. La ciencia es un buen método de investigar la verdad; la religión es la búsqueda de una manera de vivir. La ciencia progresa, pero en esta era científica, el mundo necesita, más que nunca, la inspiración que la religión puede darle”.

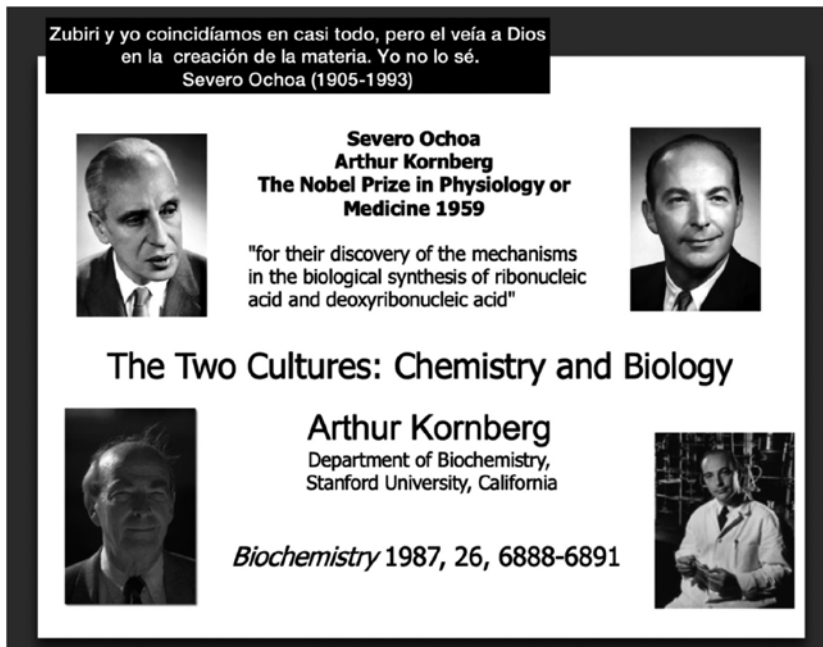
### **LA TIPOLOGÍA DE BARBOUR Y ALTERNATIVAS**

La tipología de Ian Graeme Barbour (1923-2013), padre del campo de ciencia y religión, en los 60, físico nuclear, teólogo, escritor y ganador del Premio Templeton 1999 para el Progreso de la Religión se muestra en la Fig. 23. Barbour se doctoró en

**FIGURA 21**  
**FRANCIS CRICK (1916-2004): LA SORPRENDENTE HIPÓTESIS**



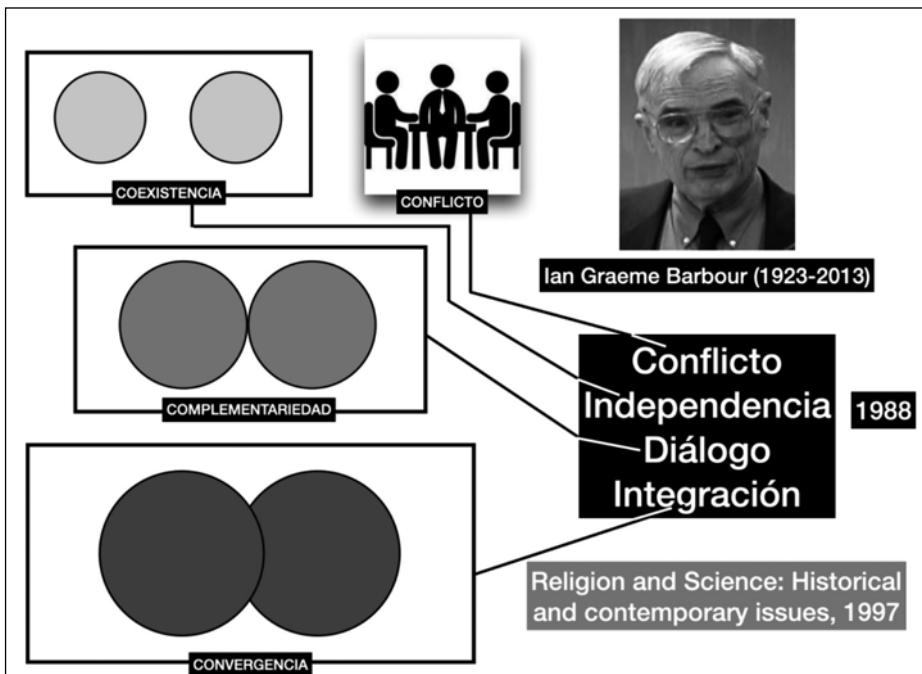
**FIGURA 22**  
**ARTHUR KORNBERG (1918-2007) Y LAS DOS CULTURAS: LA DE LA QUÍMICA Y LA DE LA BIOLOGÍA**



Física por la Universidad de Chicago donde fue “assistant teaching” de Enrico Fermi (1901-1954). También fue el Winifred Atherton Bean y profesor Emérito de Ciencia, Tecnología y Sociedad en el Carleton College en Northfield, Minnesota. En 1988 introduce los cuatro enfoques que se habían seguido a lo largo de la historia para abordar las relaciones entre ciencia y teología, tipología que se ha convertido en canónica (De Cruz, 2017; Vanney y Silva, 2019; Florio, 2020), con variantes, modificaciones e incluso discrepancias aparentes.

Esas cuatro posturas son de conflicto, independencia, diálogo e integración. (Alexander, 2007, 2011; Barbour, 2002; Udías Vallina, 2000, Udías Vallina, 2012). En la Fig. 24 se compara con la de Haught y la del Instituto de Hermenéutica. John Haught (1942- ), Senior Fellow de Ciencia y Religión en el Centro Teológico Woodstock de la Universidad de Georgetown, imparte cursos sobre el problema de Dios, el método teológico, la Ciencia y la Religión, y la Religión y la Ecología. El Instituto Internacional de Hermenéutica (IIH), fundado en 2001 es un centro de investigación autónomo, internacional e interdisciplinario al que se vinculan universidades de todo el mundo a través de una red de asociados y de un consejo asesor. Tiene por objeto el fomento y la articulación de una hermenéutica general, que abarca todas las humanidades y ciencias sociales. En la Fig. 25 y en la Tabla 17 se recogen obras de Barbour.

**FIGURA 23**  
**TIPOLOGÍA DE BARBOUR Y COMPARACIÓN CON LA USADA EN EL TÍTULO DE ESTE TRABAJO**




**FIGURA 24**  
**ESQUEMA COMPARATIVO DE LAS TIPOLOGÍAS DE BARBOUR, HAUGH, INSTITUTO DE HERMENÉUTICA Y ESTE TRABAJO**

Ian Barbour, right, who had physics and divinity degrees, with Sir John Templeton after winning the Templeton Prize in 1999.  
 Marty Lederhandler/  
 Associated Press



Ian Barbour (derecha) Premio Templeton 1999




John Haught (1942- )

Asuero, 2022	Ian Barbour	Instituto para la hermenéutica e investigación sistemática	John Haught (1942- )
Conflicto	Conflicto	Conflicto	Conflicto
Coexistencia	Independencia	Rechazo de la articulación	Contraste
Complementariedad	Diálogo	Complementariedad	Contacto
Convergencia	Integración	Convergencia	Confirmación

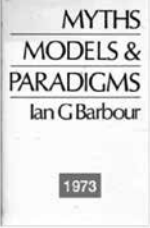
físico

astrónomo


**FIGURA 25**  
**OBRAS DE IAN G. BARBOUR**




1965



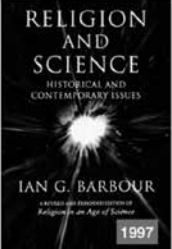
1973




Gifford Lectures  
1990  
IAN BARBOUR



Gifford Lectures  
1993  
IAN BARBOUR



1997



2000

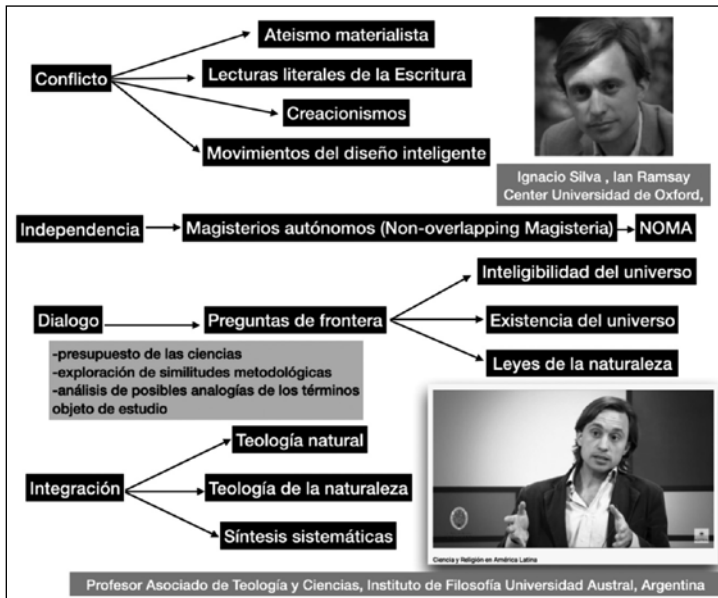
The prestigious Gifford Lectureships were established by Adam Lord Gifford (1820–1887) - universities of Edinburgh, Glasgow, St. Andrews and Aberdeen - to promote and diffuse the study of Natural Theology in the widest sense of the term —in other words, the knowledge of God”.

TABLA 17  
OBRAS DE IAN BARBOUR

<b>Problemas de la Ciencia y de la Religión (1965)</b>
<b>Mitos, modelos y paradigmas (1973)</b> -herramienta útil para aquellas personas que desean estudiar las metodologías y los enfoques de los científicos y estudiosos de la religión.
<b>Religión en la era de la ciencia (1990), y Ética en la era de la Tecnología (1993)</b> , resultado de sus conferencias Gifford (1989-1991) -Aberdeen
<b>Religión y Ciencia: Cuestiones Históricas y actuales (1997)</b> – usado a menudo como libro de texto.
<b>Cuando la ciencia se reúne con la religión: enemigos, extraños o socios (2000)</b> o “El encuentro de la ciencia y religión: rivales, desconocidas o compañeras de viaje”.

Un excelente desarrollo de la tipología de Barbour ha sido llevado a cabo por Ignacio Silva (2013) (Fig. 26). Una clasificación de diferente naturaleza es llevada a cabo por Mikael Stenmark (Fig. 27), Decano de la Facultad de Teología en la Universidad de Uppsala, en “Como relacionar ciencia y religión: una aproximación multidimensional” (2004) (Stenmark, 2005; Smedes, 2005). También en el capítulo 14 del “The Cambridge Companion to Science and Religion” editado por Peter Harris: “Ways of relating science and religion”, pp 278-295.

FIGURA 26  
DESARROLLO DE LA TIPOLOGÍA DE BARBOUR DEL PROFESOR IGANCIO SILVA

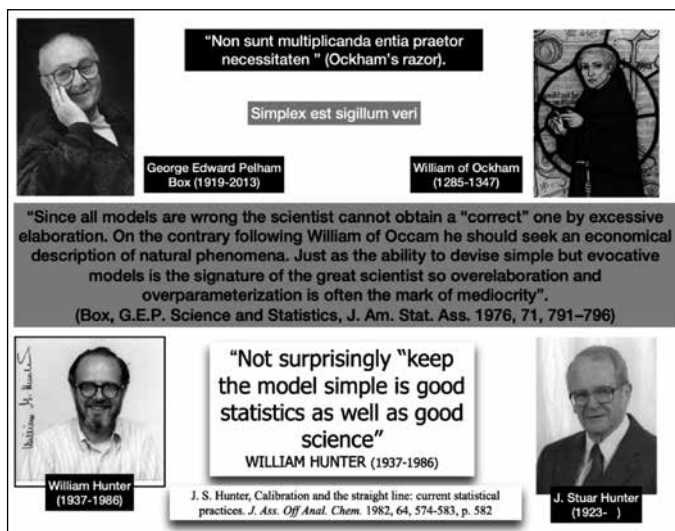


**FIGURA 27**  
**ESQUEMA MULTIDIMENSIONAL DE MIKAEL STENMARK**



Las clasificaciones simples sirven como introductorias (Box, 2006; Hunter, 1981). Si nos atenemos a la navaja de Guillermo de Ockam (1287-1347) (Fig. 28), filósofo franciscano inglés y teólogo (Esteva de Sagrera, 2006; Hoffmann et al., 1996): “Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem” (no hay que multiplicar las entidades sin necesidad).

**FIGURA 28**  
**LA NAVAJA DE OCKAM**





## CONFLICTO

Tras la publicación en 1859 del “Origen de las Especies” de Charles Robert Darwin (1809-1882) la supuesta contienda entre ciencia y religión se materializa por Draper y Dickson en terminología militar. La “Historia de los Conflictos entre la Ciencia y la Religión” (Fig. 29) es publicada por John William Draper (1811-1882), en 1874 (ed. española 1876), químico de la Universidad de Nueva York e historiador estadounidense. La obra ve la luz en una serie de divulgación dirigida por Edward Livingstone Youmans (1821-1887) editor de “Ciencia Popular Mensual”, alcanzando las 50 ediciones en 1930. Merece una fuerte contestación; e.g. por Tomás Cámara y Castro (1847-1904) (obispo de Salamanca) (Camara, 1880), Cornoldi (1878), Orti y Lara (1881) y Joaquín Rubio y Ors (1818-1899) (Rubio y Ors, 1881).

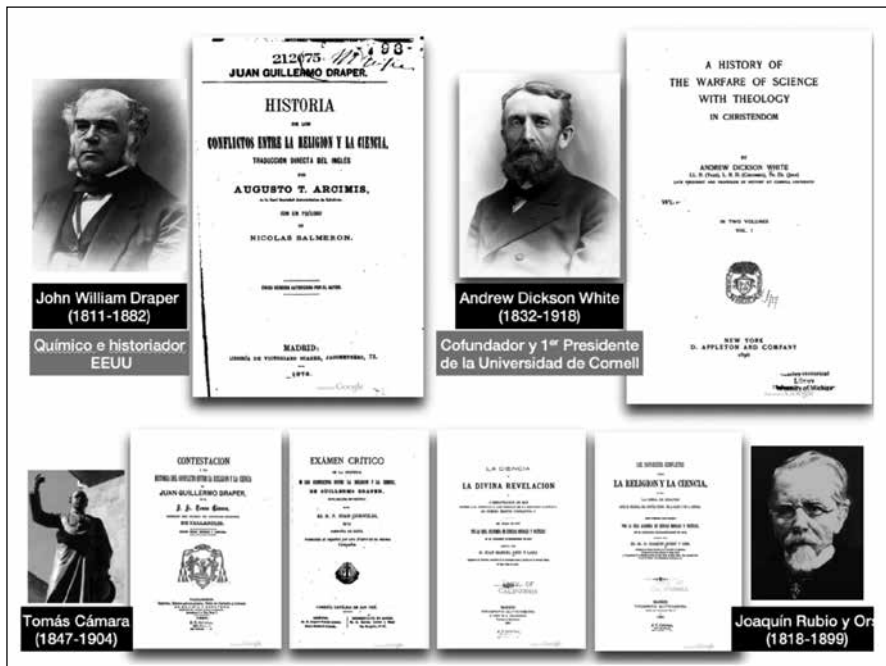
Una historia de la guerra de la ciencia con la teología en la cristiandad (en dos tomos) se publica por Andrews Dickson White (1832-1918) (Fig. 29), cofundador y primer Rector de la Universidad de Cornell (1867-1885), más erudito que Draper. Esta obra se incardina en una tendencia que trata de legitimar la educación superior secular, en contraposición a la de las universidades patrocinadas por la Iglesia. White entendió la guerra más como una contienda intelectual que política. La gran mayoría de los autores actuales en el campo de la ciencia y religión es crítica con el modelo de conflicto y cree que se basa en una lectura superficial y partidista del registro histórico (Bowler, 2001; Bouma, 1999; Laszlo, 2005; Numbers, 2009; Plantinga, 2012; Schlicht, n.d.; Zanatta et al., 2017).

Draper concluye con (Fig. 30) : ¿Y puede alguien dudar del resultado del conflicto próximo? Todo lo que descansa en la ficción y el fraude será derribado; instituciones que organizan imposturas y extienden falsedades deben mostrar qué razones tienen para existir. La fe tiene que dar cuenta de sí a la razón; los misterios deben dar lugar a los hechos. La religión tiene que abandonar la posición imperiosa y dominadora que por tanto tiempo ha mantenido contra la ciencia. Debe haber absoluta libertad para el pensamiento. Los eclesiásticos aprenderán a conservarse dentro del dominio que han escogido, y dejarán de tiranizar al filósofo, que, convencido de su propia fuerza y de la pureza de sus intenciones, no soportará por más tiempo esta injerencia. Lo que escribió Esdras en las márgenes del río de los sauces llorones, junto a Babilonia, hace más de veintitrés siglos, aún se conserva. “La verdad es eterna y no perece jamás; vive y vence siempre”.

Por otra parte, Anthony Franklin Clarke Wallace (1923-2015) (Fig. 30), antropólogo canadiense-americano especialista en culturas nativas americanas, insiste en 1966: “La creencia en poderes sobrenaturales está destinada a desaparecer, en todo el mundo, como consecuencia del crecimiento del conocimiento científico, y de su cada vez mayor acierto y difusión” (Wallace, 1966). La tesis de la sustitución no parece haber satisfecho las expectativas (Clayton, 2005; Harrison, 2017); las explicaciones científicas no han eliminado las creencias religiosas. Alvin Plantinga (1932- ), Profesor de la Universidad de Notre Dame (Indiana), defensor de la racionalidad de las creencias religiosas, adopta en un breve libro la postura de que el conflicto entre la ciencia y la religión teísta es en realidad superficial, y que en un nivel más profundo están en concordancia. Plantinga

es el filósofo de Dios ortodoxo protestante líder de los Estados Unidos. En la Tabla 18 y en la Fig. 31 se muestran los cuatro jinetes del nuevo ateísmo, cuyas obras se han convertido en un filón editorial: Dawkins, Harris, Dennett e Hitchens.

**FIGURA 29**  
**DRAPER Y SMITH: LA TESIS DEL CONFLICTO, Y CRÍTICAS CONSIGUIENTES**



El 30 de septiembre de 2007 se proyectó en televisión un documental “The Four Horsemen” sobre religión (persistente y pernicioso fenómeno del que son tan temible azote) de 2 horas fragmentado en 12 partes, que trataba –sobre el hecho religioso, sobre Dios y su existencia– y sobre los creyentes. “What can be asserted without evidence can also be dismissed without evidence” (Hitchens’s razor). Una persona podría ser ateo y desear que la creencia en Dios fuera correcta, afirma Hitchens, pero un “anti teísta”, un término que trata de poner en circulación es alguien que se siente aliviado, de que no haya evidencia para tal afirmación.

El libro “Ciencia y Religión ¿son ellas compatibles?”, Elvin Plantinga vs Daniel Dennett, es en sí una reimpresión de un debate que tuvieron ambos en una conferencia de filosofía hace años, aunque actualizado en algunos aspectos. El debate, es educado y respetuoso en términos generales, con detalles de sarcasmo y burlas, a veces, en algunos puntos. Eric Steinhart, profesor de filosofía en la Universidad William Paterson (Wayne, NJ), apuesta (Fig. 32) por las ideas de Richard Dawkins (De Cruz, 2021; Steinhart, 2020).

**FIGURA 30**  
**ANTHONY WALLACE (1923-2015): LA TESIS FALLIDA DE LA SUSTITUCIÓN**

¿Y puede alguien dudar del resultado del conflicto próximo? Todo lo que descansa en la ficción y el fraude será derribado; instituciones que organizan imposturas y extienden falsedades, deben mostrar qué razones tienen para existir. La fe tiene que dar cuenta de sí a la razón; los misterios deben dar lugar a los hechos. La religión tiene que abandonar la posición imperiosa y dominante que por tanto tiempo ha mantenido contra la ciencia. Debe haber absoluta libertad para el pensamiento. Los eclesiásticos aprenderán a conservarse dentro del dominio que han escogido, y dejarán de tiranizar al filósofo, que, convencido de su propia fuerza y de la pureza de sus intenciones, no soportará por más tiempo esta injerencia. Lo que escribió Esdras en las márgenes del río de los sauces llorones, junto a Babilonia, hace más de veintitrés siglos, aún se conserva. «La verdad es eterna y no perece jamás; vive y vence siempre.»

**BOG**

J.G. Draper: *Historia de los conflictos entre la religión y la ciencia*

La creencia en poderes sobrenaturales está destinada a desaparecer, en todo el mundo, como consecuencia del crecimiento del conocimiento científico, y de su cada vez mayor acierto y difusión

Anthony Wallace (1966)

Las explicaciones científicas no han eliminado las creencias religiosas. La tesis de la sustitución no parece haber satisfecho sus expectativas...

2012  
 WHERE THE CONFLICT REALLY LIES  
 SCIENCE, RELIGION, & NATURALISM  
 ALVIN PLANTINGA

Alvin Plantinga (1932- )

1876

Anthony Wallace (1923-2015)

**TABLA 18**  
**DAWKINS, HARRIS, DENNETT E HITCHENS, LOS CUATRO JINETES DEL NUEVO ATEÍSMO**

<p><b>Clinton Richard Dawkins (1941- )</b>. Biólogo evolutivo, etólogo, zoólogo y divulgador de la ciencia británico. Titular de la Cátedra Charles Simonyi de Difusión de la Ciencia, Universidad de Oxford, 2008 (Richard Dawkins Foundation for Reason and Science). <i>The God Delusion (2006)</i>.</p>
<p><b>Sam Harris (1967- )</b>. Filósofo neurocientífico, cofundador y director del Proyecto Razón. Desde 2020 miembro de “Giving What We Can” (10 % organizaciones benéficas). <i>“The Moral Landscape (2010)”</i>. <i>“The End of Faith (2004)”</i>.</p>
<p><b>Daniel C. Dennett (1942- )</b>. Filósofo de la Ciencia y escritor EE. UU. Director del Centro de Estudios Cognitivos de la Universidad de Tufts – Catedrático de Filosofía – 1987 Miembro de la Academia de Artes y Ciencias). <i>“Romper el Hechizo, la religión como un fenómeno natural”</i>.</p>
<p><b>Christopher Eric Hitchens (1949-2011)</b>. Escritor, periodista, ensayista, orador, crítico literario y polemista angloestadounidense (residió en los EE. UU.). “El concepto de un Dios o un ser supremo es una creencia totalitaria que destruye la libertad individual... Pertenece a la Internacional Socialista Marxista. <i>“God is Not Great”</i>.</p>

**FIGURA 31**  
**LOS CUATRO JINETES DEL NUEVO ATEÍSMO: DAWKINS, HARRIS, DENNETT E HITCHENS**



**FIGURA 32**  
**ERIC STEINHART: LA PROFESIÓN DE FE EN DAWKINS**

**Daniel C. Dennett**  
Co-Director, Center for Cognitive Studies, Professor, Philosophy Dept, Tufts University  
Verified email at tufts.edu · 10 messages  
psychology · evolution · artificial intelligence · philosophy

TITLE	CITED BY	YEAR
Consciousness explained DC Dennett Princeton, NJ	18544	1984
Dawkins's dangerous idea DC Dennett The Sciences 38 (3), 34-40	12846	1998
The intentional stance DC Dennett MIT press	10465	1988
Realism: Philosophical essays on mind and psychology DC Dennett MIT press	8729	2017

**DANIEL C. DENNETT**

<b>Citas</b>	<b>106 199</b>
<b>Índice h</b>	<b>104</b>
<b>Índice i10</b>	<b>416</b>

**SAMUEL S. HARRIS**

<b>Citas</b>	<b>583</b>
<b>Índice h</b>	<b>15</b>
<b>Índice i10</b>	<b>17</b>

**Daniel C. Dennett/ Alvin Plantinga**

**ERIC STEINHART**

<b>Citas</b>	<b>1334</b>
<b>Índice h</b>	<b>16</b>
<b>Índice i10</b>	<b>28</b>

**Eric Steinhart**  
2020  
William Paterson University of New Jersey, Wayne (NJ)

Para Javier Puerto Sarmiento (1950- ), historiador (Fig. 33): El pensamiento científico surgió cuando se empezó a buscar la verdad dentro de la naturaleza. El principio de autoridad carece de valor en ciencia (Asuero 2015; Asuero, 2019) (Figs. 33 y 34). Tratándose de ciencia – Galileo-, la autoridad de un millar no vale el humilde razonamiento de un solo individuo. La verdad científica no se decide por mayoría (Nasetti, 2018). El conflicto entre ideas admitidas y emergentes es una constante histórica. Se asiste con Kuhn (1962) a resistencia, revolución y cambio de paradigma.

FIGURA 33  
EL RESURGIR DEL PENSAMIENTO CIENTÍFICO

**PRINCIPIO DE AUTORIDAD, EXPERIMENTACIÓN E IMAGINACIÓN**

El argumento de autoridad consiste en aceptar una proposición por el hecho de sostenerse en una fuente asumida como cierta y no sujeta a crítica ni debate. Este conflicto entre ideas admitidas y emergentes es una constante histórica. Asociadas con Kuhn (21) a resistencia, revolución y cambio de paradigma. «Tratándose de ciencia –Galileo–, la autoridad de un millar no vale (22) el humilde razonamiento de un solo individuo. La verdad científica no se decide por mayoría. Roger Bacon concibe (23) «N) la voz de la autoridad ni el peso de la razón y del argumento son tan significativos como el experimento...». En su misma línea se pronuncia (24) Francis Bacon. Newton antes (25) el *Hydrobia non frigida*. Para Pasteur, su cambio (26), «las ideas *a priori*, las hipótesis, son el alma del progreso de la ciencia». Pasteur (27) tiene un libro acerca de este tema, digno de elogio. La falta de rigurosos principios matemáticos otorga a la química, en el sentir (28) de Victor Meyer, una plasticidad de la que la lógica y la ciencia matemáticas carecen. Van't Hoff aboga por el rol de la imaginación (29-30) en las relaciones causa-efecto, en adición al de la observación... Al introducir esta variable (Plasticidad) el placer creativo de la química se torna analógico al artístico.

**Javier Puerto: 'El pensamiento científico surgió cuando se empezó a buscar la verdad dentro de la naturaleza'** 2017

En el siglo XVI se desencadenó en Europa un cambio radical en la manera de concebir la realidad que sacude los cimientos de las concepciones preestablecidas —idealizadas— sobre el ser humano, la naturaleza y el cosmos, una transformación que culmina en una nueva ciencia a lo largo del siglo XVII. Así lo explicó el 16 de marzo Javier Puerto, de la Real Academia de la Historia, en su conferencia 'La nueva ciencia. El método experimental', dentro del ciclo "Historia de las Ideas" de la Fundación BBVA.

**CHEMISTRY** 2010

**Nicolas Copernico (1473-1543)**

**1364**

**Universidad Jaguelónica (Cracovia)**

**Robert Boyle (1627-1691)** es el primer gran exponente del sistema filosófico inductivo de Francis Bacon (1561-1626) basado en la experimentación, observación y medida, tal como propugna en su obra "Novum Organum", en 1620.

**A.G.Asuero, 2019**

"There are two methods of obtaining knowledge, by argument and by experiment; argument makes conclusions and forces us to agree to them, but it does not make us feel certain or so remove suspicion that the mind rests in assurance of truth, unless this be also found by experience".

**Roger Bacon (1214-94) in Opus Majus**

**Francis Bacon (1561-1626)**

**Plus ratio quam vis**  
Reason is greater than force


**Conferencias Boyle 1692/2004**

Clerk Maxwell fue el primer director del Laboratorio Cavendish. En la puerta del antiguo laboratorio (1873) Cavendish figura la inscripción (Fig. 35) “Magna opera Domini exquisita in omnes voluntates ejus” (Anon, 1874; Faraday Institute, 2010; The Cavendish Laboratory, n.d.). Grandes son las obras del Señor, dignas de estudio para los que las aman (Salmo 111, Verso 2). Andrews Briggs (1950- ), actual Profesor Emérito de Nanomateriales por la Universidad de Oxford, estudiante de doctorado (PhD) en 1973 sugirió que la frase en inglés figurase a la entrada del nuevo edificio. El Comité de Reglamento estuvo de acuerdo tanto con la idea como con la elección de la traducción de Coverdale (1535) inscrita en caoba por Will Carter. “The Works of the Lord are great, sought out of all them that have pleasure therein” (Pippard, 1987). Esto supone un reconocimiento de que la herencia cristiana ha sido importante para el desarrollo de la ciencia moderna. El Lema de la “Oxford University” es “El Señor es mi luz” (Salmo 27).


FIGURA 34  
EL PRINCIPIO DE AUTORIDAD

**EL PRINCIPIO DE AUTORIDAD: EJEMPLOS EXTRAÍDOS EN EL ÁMBITO DE LA QUÍMICA**

Por el Prof. Dr. D. Agustín G. Asuero, 2015  
*conferencia del Ciclo "Historia y Filosofía de la Ciencia y de la Técnica", celebrada el día 1 de junio de 2015.*



Lavoisier  
Andrés del Río  
Wholer  
Pasteur  
Perrin  
Mendeleyev  
Ostwald  
Yallow  
Ballester  
Kroto  
Gueim y Novosiólov




Descroizilles  
Proust  
Curaudau  
Balard  
Döbereiner  
Mohr  
Gerhardt  
Penny  
Kolthoff

Berzelius  
Liebig  
Döbereiner  
Newlands  
Gerhardt  
Cannizaro  
Arrhenius  
van't Hoff  
Sachse  
Boltzman  
Wasterton  
Fajans  
Pourbaix  
Kolthoff

Citas: 7304  
Índice h: 35  
Scholar  
Google

FIGURA 35  
EL CAVENDISH LABORATORY: MAGNA OPERA DOMINI EXQUISITA IN OMNES VOLUNTATES EJUS

**CAVENDISH LABORATORY**  
1873 - Cambridge University



The door to the old Cavendish lab, with inscription 1973


Magna opera Domini exquisita in omnes voluntates ejus

The works of the Lord are great, sought out of all them that have pleasure therein

Grandes son las obras del Señor, dignas de estudio para los que las aman

Vulgate Version of Psalm 111 verse 2      The Cavendish Laboratory

James Clerk Maxwell (1831-1879)      To cite this article: A B Pippard 1987 *Eur. J. Phys.* **8** 221



Andrew Briggs (1950-)

*NATURE* 139


THURSDAY, JUNE 25, 1874

**THE NEW PHYSICAL LABORATORY OF THE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE**

ON the 16th inst., at a congregation held in the Senate House, Cambridge, the Cavendish Laboratory was formally presented to the University by the Chancellor. The reins for research possessed by Prof. Clerk Maxwell


near the south end of this front. The doors, which are very massive, are beautifully carved in oak, and bear, in old English letters, the inscription "Magna opera Domini exquisita in omnes voluntates ejus," which is the Vulgate version of Psalm cxi. 2. Over the gateway are the arms of the Duke of Devonshire on the left, and the University arms on the right, the motto of the Cavendish family, "Cavendo tutus," occupying the centre; and the whole is surmounted with a beautifully carved statue of the Duke in his robes as Chancellor of the University, and bearing in his hand the Cavendish laboratory. The lower portion

Actual Emeritus Professor of Nanomaterials at Oxford University, estudiante de PhD en 1973 sugiere que la frase en inglés figure a la entrada del nuevo edificio. El Comité de Reglamento estuvo de acuerdo tanto con la idea como con la elección de la traducción de Coverdale (1535) inscrita en caoba por Will Carter



Brian Pippard (1920-2008)

El Señor es mi luz  
Salmo 27



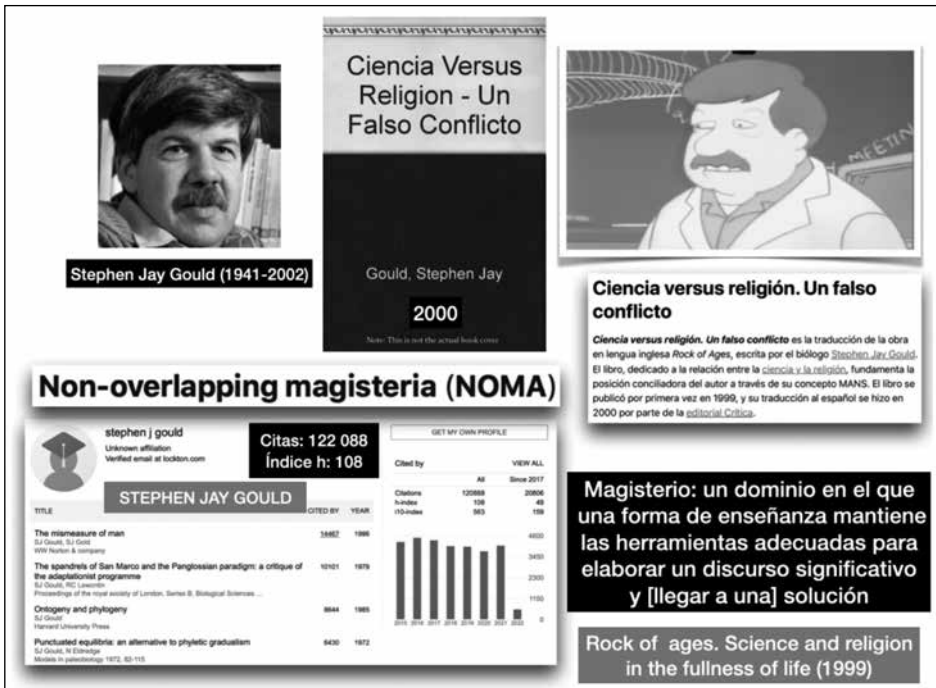
OXFORD UNIVERSITY

Reconocimiento de que la herencia cristiana ha sido importante para el desarrollo de la ciencia moderna

**INDEPENDENCIA**

Stephen Jay Gould (1941-2002), agnóstico, paleontólogo estadounidense, aboga por la tesis de la independencia -NOMA- Non overlapping magisteria – (Fig. 36). El modelo de independencia sostiene que la ciencia y la religión exploran dominios separados que se formulan preguntas distintas. “La falta de conflicto entre la ciencia y la religión según Gould (2001) surge de la falta de superposición entre sus respectivos dominios de experiencia profesional”. Gould identifica las áreas de especialización de la ciencia como preguntas empíricas sobre la constitución del universo. Y los dominios de especialización de la religión como valores éticos y de significado espiritual (Barzagui y Corcó, 2016).

**FIGURA 36**  
**LA TESIS DE GOULD: NON OVERLAPPING MAGISTERIA (NOMA)**



La propuesta no es totalmente nueva. Ya en su “Tratado del hombre” de 1633, René Descartes (1596-1650) había articulado un dualismo de sustancias en aras de delimitar el alcance de la revolucionaria ciencia, que por vez primera en el mundo cristiano surgía como menester diferenciado de la religión (separación metafísica ilustrado-renacentista entre la naturaleza y los dominios sobrenaturales).

## TESIS DE LA COMPLEJIDAD

John Headley Brooke (1944- ): en “Ciencia y Religión: perspectivas históricas” (1991), Premio Watson-Davis de la History of Science Society al mejor libro de historia de la ciencia dirigido al público en general, sostiene la tesis de la complejidad (Fig. 37). Para Brooke es conveniente dejar a la historia desvelar la complejidad de la vida real y resistir la tentación de convertirla en un instrumento apologético. “La investigación rigurosa en la historia de la ciencia pone de manifiesto una relación tan extraordinariamente variada y compleja entre ciencia y religión en el pasado que resulta difícil sostener tesis generales”. La complejidad es la verdadera lección que se impone. La ciencia y la religión no pueden considerarse aislada de sus contextos históricos. Hay que tener en cuenta (Silva, 2013):

- Presupuesto - búsqueda de un orden dado - habla de una doctrina de la creación - filósofos naturales.
- Justificación - (escritos de Boyle) del método experimental a través de los beneficios religiosos - la naturaleza me da más herramientas para ayudar al otro...
- Motivación - búsqueda del predominio de la naturaleza (pecado original) - final del siglo XVI-XVII adentrarse en la naturaleza (influencia de la pérdida de esos poderes intelectuales requiere que se tenga que esforzar, en desentrañar).
- Regulación.
- Selección.
- Constitución.

El árbol de la ciencia (Fig. 38) es una metáfora empleada alusiva a la organización del conocimiento humano, cuyas raíces se remontan al Génesis y, junto con la expulsión del paraíso, han sido temas recurrentes en el arte y en la literatura, e.g. el Paraíso Perdido (1667) de John Milton (1608-1674), Miguel Ángel Buonarroti (1475-1564) (Capilla Sixtina), Tommaso di ser Giovanni di Mone Cassai o Massaccio (1401-1428) (Capilla Brancacci, Santa María del Carmine, Florencia), en el que tal vez se inspira Miguel Ángel, Tommaso di Cristoforo Fini o Masolino da Panicale (1383-1440), fachada de la Catedral de Milán y Capitel de San Juan de la Peña (Huesca) o la novela de Pío Baroja (1872-1956), “El Árbol de la Ciencia”, publicada en 1911.

Un referente más próximo del árbol de la ciencia se encuentra en Petrus Hispanus (1277) con su árbol porphyriana. Porfirio (232-304 dC) con su Isagoge o tratado de las cinco voces (género, especie, diferencia específica, propio, accidente) goza de prestigio entre los filósofos medievales, mostrándose partidario de Aristóteles a este respecto. El árbol de Porfirio, en el que los conceptos van de lo universal a lo particular, constituye el precedente de los grupos (taxonómicos) establecidos posteriormente para las clasificaciones biológicas: Reino, Tipo, Clase, Orden, Familia, Género y Especie.



**FIGURA 37**  
**BROOKE O LA TESIS DE LA COMPLEJIDAD**



La Cosmovisión Luliana, Ramon Llull (1237-1320) comprende 14 árboles principales y 2 auxiliares (Fig. 39). “El avance del aprendizaje” es un libro de 1605 de Francis Bacon (1561-1626), en el que divide el proceso humano intelectual (Fig. 40) entre Memoria, Imaginación y Razón, categorías que se corresponden con la Historia, Poesía y Filosofía. Inspiró la estructura taxonómica de la influyente “Enciclopedia” editada (1751) por Jean le Rond d’Alembert (1713-1783) y Denis Diderot (1713-1784), que constituía un compendio de los conocimientos humanos. También se inspiran en ella Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770-1831), William Torrey Harris (1835-1909), y Melvil Louis Kossuth Dewey (1851-1931), para la clasificación decimal que se ha seguido en todas las bibliotecas del mundo (Asuero, 2015; Ferreira y Sales, 2018).

La filosofía en la enciclopedia se dividía en (Fig. 41): “metafísica, ciencia de dios, y ciencia del hombre, de una parte, y ciencia de la naturaleza, de otra, comprendiendo esta la física en general, la matemática y los tipos particulares de física”. La química se consideraba como un tipo particular de física. A Ernest Rutherford (1871-1937) se le atribuye la sentencia “All science is either physics or stamp collecting” (Hayes, 2004); no obstante, el Premio Nobel que consiguió, en 1908, fue el de Química.

Peter Harrison (1955- ) en “Los territorios de la ciencia y de la religión” (Harrison, 2020; Harrison, 2006; Recio, 2019; Sequeiros San Román, 2020); vuelve la tesis de la complejidad más compleja aún (Fig. 42). Harrison, Director of the Institute for Advanced Studies in the Humanities at the University of Queensland, publica en 2006 un trabajo en el “Journal of Religion”: “Ciencia y Religión: construyendo los límites”. Los mapas conceptuales que organizan conceptualmente la mente humana son muy cambiantes y dependen de múltiples factores sociales, culturales y económicos.


**FIGURA 38**  
**EL ÁRBOL DE LA CIENCIA, METÁFORA USADA ACERCA DE LA ORGANIZACIÓN DEL CONOCIMIENTO HUMANO**



**EL ARBOL DE LA CIENCIA**  
 Metáfora usada acerca de la organización del conocimiento humano

La Biblia: Génesis 2.9  
 Petrus Hispanus (1277) – arbor porphyriana  
 Ramon Lull (1232?-1316) – El árbol de la ciencia

“Tomó Dios al hombre y le puso en el jardín de Edén para que lo cultivase y lo guardase. Y dio al hombre este mandato: «Puedes comer de todos los árboles del jardín, mas del árbol de la ciencia del bien y del mal no comerás en modo alguno, porque, el día en que comieres, morirás”.


*Libro del Génesis 2,15-17*


**Hugo van der Goes**

**FIGURA 39**  
**LA COSMOVISION LULIANA: LOS ÁRBOLES PRINCIPALES Y AUXILIARES**




**Árboles principales**

- Elemental: estudia la física
- Vegetal: la botánica
- Sensual: biología
- Imaginal: artes
- Humana: antropología
- Moral: ética
- Imperial: política
- Apostolica: eclesiología
- Celestial: astrología
- Angelical: angelología
- Eviternal: escatología
- Maternal: mariología
- Cristiana: cristología
- Divinal: teología

**Árboles auxiliares**

- Ejemplifical: guía ilustrativa de los anteriores, a los que explica echan mano de ejemplos, proverbios y refranes
- Cuestional: refrenda en términos de la lógica las cuestiones relativas a los demás

En esta pieza, el beato recurre a una analogía común en él: la comparación orgánica, en la que cada ciencia se representa como un árbol con raíces, tronco, ramas, hojas y frutos. Las raíces representan los principios básicos de cada ciencia; el tronco, la estructura; las ramas, los géneros; las hojas, las especies; y los frutos, los individuos, sus actos y sus finalidades.



**Universidad de Barcelona**

Existen en la cosmovisión luliana catorce árboles principales y dos auxiliares

Raimundo Lull (1232-1316)

FIGURA 40  
EL PROCESO INTELLECTUAL HUMANO Y LA CLASIFICACIÓN DECIMAL

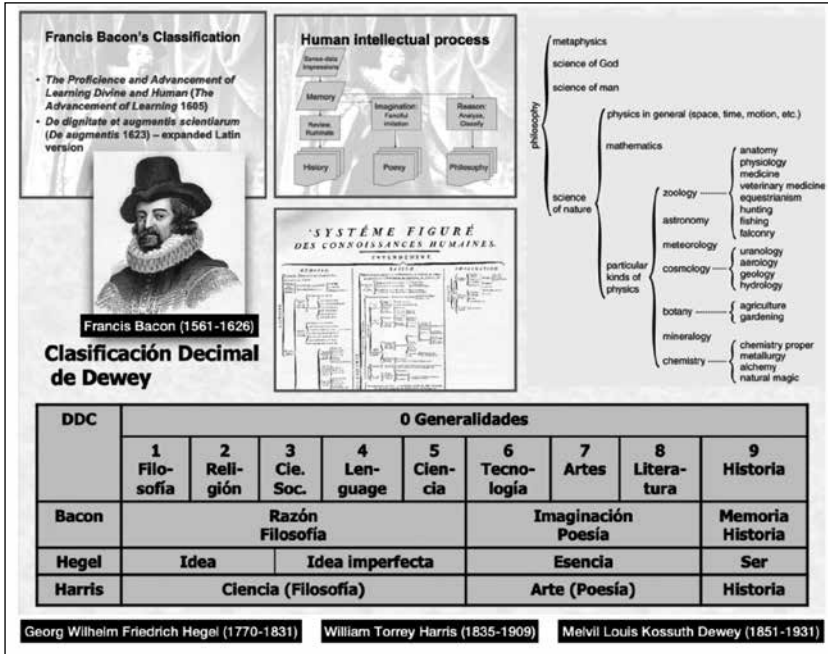
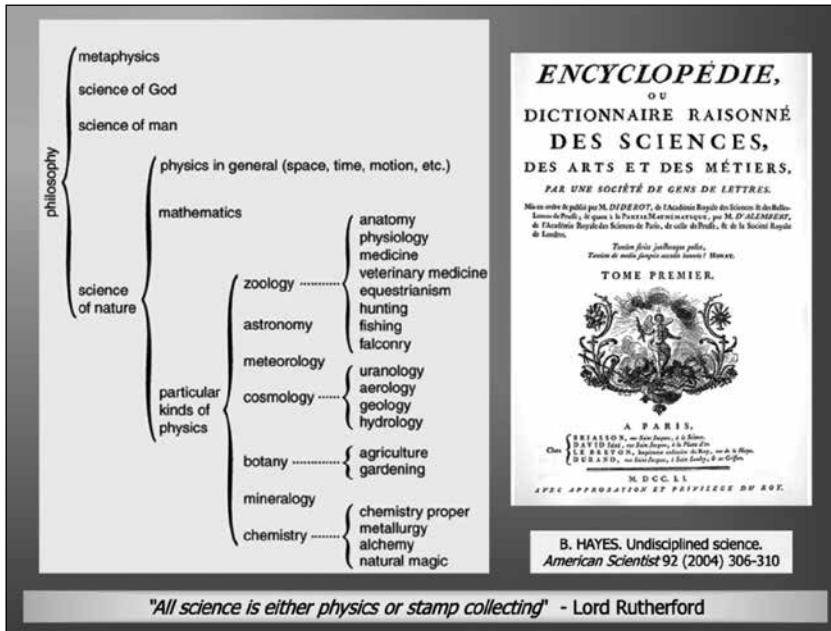


FIGURA 41  
LA ENCICLOPEDIA Y LAS DIVISIONES DE LA FILOSOFÍA



En “Ciencia y Religión en el Mundo” (2011), Brooke y Numbers (Eds), Livingstone (2011) contribuye (Fig. 43) con el capítulo ¿Qué ciencia? ¿Qué religión? (Livingstone, 2011). “Ciencia” y “religión” son conceptos creados relativamente no hace mucho; la ciencia en el siglo XIX y la religión en el siglo XV, pretendiendo el autor hacer más que una afirmación histórica sobre la aplicación anacrónica de conceptos modernos al pasado Ciencia.

Harrison publica en 2015 “Los territorios de la ciencia y religión”. Hay que:

- Localizar,
- Pluralizar,
- Hibridizar,
- Politizar

Explicitar los contextos locales, políticos y sociales donde se dan estas relaciones; no existe una relación unívoca entre ciencia y religión; diversas ciencias/ diversas religiones.

Los ensayos de “The Warfare between Science and Religion: The Idea that Wouldn’t Die” (Hardin et al., 2018; Branch, 2020) adoptan un enfoque interdisciplinario para cuestionar la relación histórica entre ciencia y religión.

“Repensar la historia, la ciencia y la religión: una exploración del conflicto y el principio de complejidad (2019)”. Esta colección editada por Bernard Lightman (2019), Profesor de Humanidades en la Universidad de York, Toronto, Canadá, y ex presidente de la Sociedad de Historia de la Ciencia, es el producto de un simposio de 2 días sobre «Ciencia y Religión: Explorando la Tesis de la Complejidad», durante el Congreso Internacional de Historia de la Ciencia y la Tecnología celebrado en Río de Janeiro en 2017.

Esta obra es complementaria de “The Warfare between Science and Religion: The Idea That Wouldn’t Die” (Hardin et al., 2018), que contiene las conferencias de Brooke, Ecklund, Monte Harrell Hampton, pastor en Raleigh e instructor visitante en la Universidad Estatal de North Carolina, Lightman, Livingstone y Numbers, entre otros autores. En “Repensar la Historia”, se formula una pregunta fundamental dirigida a gran parte de la historiografía contemporánea en el campo de las relaciones ciencia-religión: si la ciencia y la religión no están perpetuamente en conflicto, como tantos historiadores han afirmado en los últimos cincuenta años, ¿es la complejidad una mejor, si no la mejor manera de contar la relación entre la ciencia y la religión?

De hecho, Lightman dedica su libro de “Repensando la Historia” a John H. Brooke, el principal defensor de la complejidad. Que supone la complejidad ¿una tesis? ¿un principio? ¿Explica la posición y la contingencia de la relación ciencia-religión (cartografía en el léxico de Livingstone) o más bien la describe? La aportación positiva de la obra es que contribuye a alejarnos de aportar suposiciones fáciles sobre la relación entre la ciencia y la religión, quizás agregando un término más, complejidad, en lugar de contraste, concordancia, compatibilidad, conflicto, conversión, complementariedad, o armonía. La frase de Brooke es célebre: “No existe tal cosa como la relación entre la

**FIGURA 42**  
**PETER HARRISON: LA TESIS DE LA COMPLEJIDAD MÁS COMPLEJA (I)**

**Peter Harrison**  
Institute for Advanced Studies in the Humanities, University of Queensland  
Verified email at uq.edu.au - Homepage  
Citas: 5191  
h-index: 30

TITLE	CITED BY	YEAR
The Bible, Protestantism, and the rise of natural science P Harrison Cambridge University Press	802	2001
'Religion' and the Religions in the English Enlightenment P Harrison Cambridge University Press	664	2002
The fall of man and the foundations of science P Harrison Cambridge University Press	533	2007
The Territories of Science and Religion P Harrison University of Chicago Press	472	2015

**“Science” and “Religion”: Constructing the Boundaries**  
*Peter Harrison* / Bond University

**TESIS DE LA COMPLEJIDAD: MÁS COMPLEJA**

**Public access**

Year	Citations
2015	~100
2016	~300
2017	~350
2018	~350
2019	~350
2020	~350
2021	~350
2022	~100

Source: *The Journal of Religion*, Vol. 86, No. 1 (January 2006), pp. 81-106  
Published by: The University of Chicago Press

**Ciencia: Siglo XIX**      **Religión: Siglo XV**

**FIGURA 43**  
**LA TESIS DE LA COMPLEJIDAD, MÁS COMPLEJA (II)**

**Which Science? Whose Religion?**  
David N Livingstone    Oxford University Press, pp 278-296

**Science and Religion Around the World**  
John Hedley Brooke, Ronald L. Numbers

**THE WARFARE BETWEEN SCIENCE & RELIGION**  
(The New York Times's Best Book of 2018)

**2019**  
**Rethinking History, Science, and Religion: An Exploration of Conflict and the Complexity Principle**  
EDITED BY BERNARD LIGHTMAN  
Copyright Date: 2019  
Published by: University of Pittsburgh Press  
<https://doi.org/10.2307/j.ctvc6h4s>  
Pages: 324

**2015**  
**Localizar**  
**Pluralizar**  
**Hibridizar**  
**Politizar**

**LOS TERRITORIOS DE LA CIENCIA Y LA RELIGIÓN**  
Peter Harrison

ciencia y la religión. Es lo que diferentes individuos y comunidades han hecho de ella en una plétora de contextos diferentes” (p. 321, cursiva original, *Science and Religion*). Esa afirmación es una invitación en toda regla a tener en cuenta una tesis de la complejidad. La relación entre ciencia y religión han sido objeto de revisión en un trabajo por Iranzo Dosada y Manrique (2015).

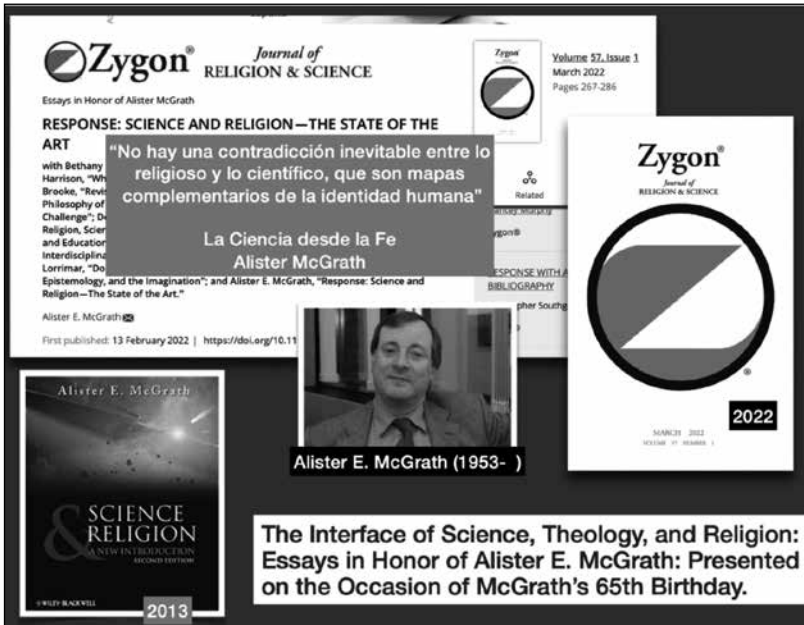
### **LA CIENCIA Y LA FE COMO COMPATIBLES: EJEMPLOS RECIENTES**

Alister McGrath (1953- ) es biofísico, teólogo de Irlanda del Norte, sacerdote anglicano, historiador intelectual, científico, y apologista cristiano. Actualmente ocupa la Cátedra Andreas Idreos en Ciencia y Religión en la Facultad de Teología y Religión (Oxford). En “La Ciencia desde la Fe” (2016): afirma que no hay contradicción inevitable entre lo religioso y lo científico, que son mapas complementarios de la identidad humana” (Fig. 44). La interfase entre ciencia, teología y religión se ha tratado en los ensayos publicados (Fig. 45) en *Zygon, Journal of Religion and Science* (2022) en honor de Alister McGrath con motivo de su 65 aniversario, publicados en *Zygon, Journal of Religion and Science* (Sollereeder, 2022; Brooke, 2022; Davison, 2022; De Cruz, 2022; Harrison, 2022; Lorrimar, 2022; McGrath, 2022; Pinsen, 2022; Ruse, 2022; Schaefer, 2022 ).

Francisco José Soler Gil, participante también en este Ciclo de Conferencias de la RASC, y Manuel Alfonseca (1946- ), en “60 preguntas sobre Ciencia y Fe”, entrevistan a profesores universitarios que responden con rigor y claridad a las cuestiones que plantea hoy la ciencia. Alfonseca es Ingeniero de Telecomunicaciones, Catedrático de la Universidad Autónoma de Madrid, Decano de la Facultad de Ingeniería, y antiguo trabajador en IBM. Harold W. Attridge (1946- ) es erudito, estudioso de la Exégesis del Nuevo Testamento (e.g. Epístola a los hebreos), del Judaísmo Helenista, y de la Historia de la Iglesia Primitiva. Es “Sterling Professor of Divinity” en la Universidad de Yale y Decano en el período 2002-2012, primer católico en dirigir dicha Escuela históricamente un feudo protestante. Es editor de “The Religion and Science Debate: Why Does It Continue” (Attridge, 2009), que contiene una introducción de Keith Thomson (1933), galés, especialista en Historia Moderna de la Universidad de Oxford. La obra contiene las conferencias de Numbers, Kenneth Raymond Miller (1948- ), biólogo celular y molecular norteamericano, Plantinga, Lawrence Maxwell Krauss (1954), físico teórico y cosmólogo norteamericano y Robert John Wuthnow (1948- ), especialista norteamericano en sociología de la religión, pronunciadas en 2006 en la Universidad de Yale, con motivo del centésimo aniversario de las Conferencias Terry

Algunos científicos partidarios de la compatibilidad entre ciencia y religión se muestran en lo que sigue Ayala (2012), Berry (2014), Clayton (2011), Coyne (2007), De Cruz (2022), Harrison (2022); Harrison (2011), Henson (2014), Johnson et al., n.d.; Lennox (2021, 2019); Miller (1999); Peacocke, Pérez Castells, 2021; Polkinghorne; Silva; Tucker e Ivakhiv, n.d., Udías Vallina, 2000).

**FIGURA 44**  
**ALISTER McGRATH O LA NO CONTRADICCIÓN ENTRE LO RELIGIOSO Y LO CIENTÍFICO**



**FIGURA 45**  
**NÚMERO ESPECIAL DE ZYGNON, JOURNAL OF RELIGION AND SCIENCE PUBLICADO EN HOMENAJE A ALISTER M. McGRATH CON MOTIVO DE SU 65 ANIVERSARIO**



Robert James “Sam” Berry (1934-2018) fue un genetista británico, naturalista y teórico del cristianismo. George V. Coyne (1933-2020), astrónomo y sacerdote jesuita, director del Observatorio Astronómico Vaticano entre 1978 y 2006. Shaun Christopher Henson es Professor de Ciencia y Religión en la Facultad de Teología de la Universidad de Oxford y sirve como Capellán del St. Hugh’s College. Javier Pérez Castells pertenece al grupo de trabajo Ciencia y Fe, de la Universidad San Pablo CEU de Madrid. Catherine M. Stucker está vinculada a la Facultad de Antropología de la Universidad de Florida.

Richard Smalley (1943-2005), padre de la nanotecnología, Premio Nobel de Química en 1996 ha dicho: “aunque sospecho que nunca entenderé completamente, ahora sé que la respuesta es muy simple. Es verdad: Dios creó el universo hace unos 13,7 mil millones de años, y desde entonces está involucrado en su creación”.

Francis Sellers Collins (1950- ) (Fig. 46), Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica (2003), Miembro de la Academia Pontificia de las Ciencias (2009), Premio Templeton (2020), líder del proyecto de secuenciación completa del genoma humano (2003), con un total de 308.714 citas en Scholar Google y un índice-h de 218, en la introducción de “Como habla Dios: la evidencia científica de la fe” (Collins, 2016) indica: “Para mí la experiencia de secuenciar el genoma humano, y de descubrir el más admirable de los textos, fue tanto un logro científico impresionante como una ocasión de veneración, Muchos están perplejos por estos sentimientos, asumiendo que un científico riguroso no podría ser también un creyente serio en un Dios trascendente”. Este libro pretende disipar esa idea al argumentar que el creer en Dios puede ser una elección completamente racional, y que los principios de la fe don, de hecho, complementarios con los principios de la ciencia.

**FIGURA 46**  
**FRANCIS COLLINS, LIDER DEL PROYECTO DE SECUENCIACIÓN DEL GENOMA**  
**HUMANO (2003)**

[https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Francis\\_Collins\\_oficial\\_photo.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Francis_Collins_oficial_photo.jpg)





Collins describe el tránsito del ateísmo a la fe, guiado de la mano de la razón y el progreso científico. Reconcilia lo que para mucho son dos polos opuestos: la rigurosidad de la ciencia con la creencia en un Dios trascendente o la fe como elección enteramente racional con principios complementarios a los de la ciencia. BioLogos, teoría que integra armónicamente Ciencia y Fe, en la que se acepta plenamente el proceso de la evolución y la selección natural, pero también la unicidad del ser humano.

## CONVERGENCIA

Pueden considerarse en la convergencia los tres aspectos (Fig. 47) de teología natural, teología de la naturaleza y síntesis sistemática (Vanne y Silva, 2019; Silva, 2013). Vamos a dar tan sólo, como a lo largo de esta conferencia, unas pinceladas. Aurelio Agustín de Hipona (354-430, San Agustín, parece haber sido el primero en haber utilizado el término de Teología Natural. William Paley (1743-1805), filósofo, teólogo y apologista británico, utiliza en su “Natural Theology” (1802) la analogía del relojero y el argumento del diseño. Influyó mucho en Darwin. Whewell (1833) consideraba la naturaleza como evidencia de la sabiduría de dios: “...my prescribed object is to lead the

**FIGURA 47**  
**CONVERGENCIA: TEOLOGÍA NATURAL, TEOLOGÍA DE LA NATURALEZA Y SÍNTESIS SISTEMÁTICA**



friends of religion to look with confidence and pleasure on the progress of the physical sciences, by showing how admirably every advance in our knowledge harmonizes with the belief of a most wise and good God...”. En uno de los volúmenes de los Tratados de Bridgewater, Conde que a su Muerte legó una suma importante de dinero para financiar una serie de volúmenes sobre “el poder, la sabiduría y la bondad de Dios, tal como se manifiesta en la creación”.

En 1925, Alfred North Whitehead (1861-1947), matemático, filósofo inglés de la teoría del proceso se manifestaba: “The distress of sensitive minds, and the zeal for truth, and the sense of the importance of the issues, must command our sincerest sympathy. When we consider what religion is for mankind, and what science is, it is no exaggeration to say that the future course of history depends upon the decision of this generation as to the relations between them. We have here the two strongest general forces (apart from the mere impulse of the various senses) which influence men, and they seem to be set one against the other-the force of our religious intuitions, and the force of our impulse to accurate observation and logical deduction (Whitehead, 1925; pp 181-182). La ciencia como la religión son elementos esenciales de la cultura y su relación sigue siendo hoy día un tema de gran interés con numerosas connotaciones en diversos niveles (Caamaño López, 2019).

**FIGURA 47**  
**CONVERGENCIA: TEOLOGÍA NATURAL, TEOLOGÍA DE LA NATURALEZA Y SÍNTESIS SISTEMÁTICA**



## ABORDAJES TEMÁTICOS EN RECIENTES ESTUDIOS Y CONEXIONES CONTEMPORÁNEAS ENTRE CIENCIA Y RELIGIÓN

Los estudios más recientes de ciencia y religión suelen centrarse en abordajes temáticos, en torno a algún descubrimiento de la ciencia contemporánea cuyo estudio es considerado desde perspectivas diversas. Actualmente los proyectos de investigación interdisciplinarios en ciencia y religión se suelen articular desde una pregunta disparadora que, por su profundidad y amplitud, admite respuestas tanto desde las ciencias como desde la teología (Vanney y Silva, 2019; Silva, 2017). Los abordajes temáticos en los estudios más recientes se muestran en la Fig. 48.

Conexiones contemporáneas en ciencia y religión abarcan una gran cantidad de temas (De Cruz, 2017, 2021; De Cruz, 2022) incluyendo el libre albedrío, la ética, la naturaleza humana y la conciencia: acción divina y creación (Silva, 2017), y orígenes humanos. En cuanto a direcciones futuras en ciencia y religión De Cruz señala la ética evolutiva, las implicaciones de la ciencia cognitiva de la religión para la racionalidad de las creencias religiosas (Fig. 49). Teólogos y científicos han comenzado a colaborar en el campo de la ética evolutiva. Sarah Coakley ha cooperado con Martin Nowak (1965), matemático y biólogo (Citas totales Scholar Google 144 945; Índice-h: 167) para comprender el altruismo y la teoría de juegos en un contexto teológico y científico más

**FIGURA 48**  
**ABORDAJES TEMÁTICOS EN LOS ESTUDIOS MÁS RECIENTES**

**Abordajes temáticos en los estudios más recientes**



**IGNACIO SILVA**

¿Fue creado el universo?  
 ¿Tiene el cosmos un propósito?  
 ¿Estamos solos en el universo?  
 ¿Puede explicarse la vida desde la química?  
 ¿Es compatible la fe cristiana con la evolución?  
 ¿Es el hombre un ser especial?  
 ¿Es suficiente la ciencia para explicar la inteligencia humana?  
 Los descubrimientos neurocientíficos. ¿apoyan o desafían el libre albedrío?  
 ¿Podrían las máquinas volverse humanas?  
 ¿Podría el hombre volverse una máquina?  
 ¿Hay vida después de la muerte?  
 ¿Es razonable creer en los milagros?  
 ¿Contribuyen las creencias a un comportamiento virtuoso?  
 ¿Conduce la ciencia al descubrimiento de un Dios personal?



**CLAUDIA E. VANNEY**

2019

Vanney, Claudia E. y Silva, Ignacio. 2019. "Ciencia y Religión". En *Diccionario interdisciplinar Austral*, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan J. Franck

amplio (Nowak y Coakley, 2013). “Today, science has few borders, and collaboration is the name of the game”(Jalali-Hervay et al., 2015). “Ce qu’il faut d’abord reconnaître, c’est que les sciences sont tellement liées ensemble qu’il est plus facile de le apprendre toutes à la fois que d’en détacher une seule des autres ” (Descartes, 1825, tome XI).

**FIGURA 49**  
**CONEXIONES CONTEMPORÁNEAS ENTRE LA CIENCIA Y LA RELIGIÓN**



**COMENTARIO FINAL**

Los dominios de la ciencia y la religión como se ha indicado previamente repetidas veces no son estáticos ni están netamente definidos, tendiendo a expandirse, lo cual facilita la continuación del debate (Dixon et al., 2010; du Toit, 2013; Ecklund et al., 2011; Harrison, 2017; Polkinghorne, 2005). Quizás pueda argumentarse que la pretendida separación entre una realidad natural (dominio de la ciencia) y una realidad espiritual (dominio de la religión) no es tanto una separación material, sino de niveles de comprensión, integración o unificación de la realidad (Attridge, 2009; Sánchez Cañizares, 2010; Davison, 2022; Polkinghorne, 1998; Polkinghorne, 2012). La ciencia logra un conocimiento válido, pero necesitado de la reflexión filosófica y teológica para lograr una visión más completa del mundo (Arana, 2020; Keller, n.d.; Chuvieco y Alexander, 2012; McGrath, 2019; McGrath, 2009; Palmer, 2023; Peacocke, 1993; Silva, Tanzellata-Nitti et al., n.d.).

Ciencia y religión no pueden considerarse asiladas de sus contextos históricos. “Los científicos del siglo XVII -Isaac Newton (1643-1727), René Descartes o Robert Boyle (1627-1691), por ejemplo, asumieron que la Naturaleza se comporta de acuerdo a leyes...que son dadas por Dios. Él ponía las leyes que podrían ser puestas en expresiones matemáticas. Ahí se ve que hay relaciones que no son conflictivas” (Silva, en Rodríguez Petersen, 2019; Newton 1692-1693). Las nuevas ideas siempre tienen connotaciones sociales y políticas que originan influencias cruzadas. La tarea de articular una hermenéutica general exige una intensa colaboración interdisciplinaria que va más allá de la filosofía, estudios religiosos y literatura comparada incluyendo todas las ciencias sociales y humanas, en esta “era de la interpretación” como la denomina Gianni Vattimo (1936- ), filósofo italiano, uno de los principales autores de la filosofía postmoderna.

La religión forma parte de la cultura de los seres humanos (Yegge, 2014), que pueden dividirse grosso modo entre los que muestran la inquietud por el hecho y las convicciones religiosas (Bautista et al., 2017; Coyne, 2007; du Toit, 2013; Johnson et al., n.d.; Larson y Witham, 1997; Rubal, 2012, Roux, n.d.; Torrance y Quingles, 2006; Tucker e Ivakhiv, 2012; Udías Vallina, 2000) y el rechazo por lo sobrenatural (Bishop, 1999; Ecklund y Park, 2009; Ecklund y Johnson, 2021; Eco y Martini, 1997; Jester, 2015; Stirrat y Cornwell, 2013). El tema tratado en la conferencia es de suficiente calado para merecer la preocupación y la atención de la prensa escrita, y digital, de forma recurrente, como hemos podido apreciar en una de las secciones de este manuscrito. Sirva lo expuesto como un “primer” a este campo de trabajo, a esta interesante materia, que nunca pasa desapercibida. El autor reconoce la deuda contraída con Wikipedia para organizar el tema de la información de las tablas y en especial también con las contribuciones de Ignacio Silva (2013), Vanney y Silva (2019) y Helen De Cruz (2017, 2022).

## **BIBLIOGRAFÍA**

- AGUILERA MOCHON, J.A., La ciencia ante las creencias religiosas. Ciencia y religión en los albores del nuevo milenio. *Mientras Tanto* 95, 125-153 (verano 2005).
- AIKMAN, D., Lemaitre follows two paths to truth. *The Famous Physicist, Who is Also a Priest, Tells Why He Finds No Conflict Between Science and Religion*. *New York Times*, Feb. 1933; ProQuest Historical Newspapers: The New York Times (1851-2009) p.g. SM3.
- ALEXANDER, D.R., Modelos para relacionar la ciencia y la religión. *The Faraday Institute for Science and Religion*. Documento Faraday nº 3. Fecha de publicación: Abril 2007. Fecha de traducción: Enero 2011.
- ALEXANIAN, M., For some questions, science may not have answers. *Physics Today* 67(2), 12 (2014).
- ALPERT, M. Can Science Rule Out God? *Scientific American Blog Network*, December 23, 2019; <https://blogs.scientificamerican.com/observations/can-science-rule-out-god/>
- ANDRADE E SILVA, J., *Los cuantos*, Editorial Guadarrama: Madrid, 1959, p. 148.
- ANON, The new physical laboratory of the University of Cambridge. *Nature* 10 (243) 139-142 (1874).
- ANSEDE, M., “La gente se resiste a la idea, pero la vida es solo química”, *El País* 13 Julio 2019; [https://elpais.com/elpais/2019/07/08/ciencia/1562590067\\_810342.html](https://elpais.com/elpais/2019/07/08/ciencia/1562590067_810342.html)

- APRENDEMOS DE LAS RELIGIONES, Cien eminentes científicos cristianos que cambiaron el mundo, 10 Junio 2019, por Javier; <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/jregamu/?p=303>
- ARAGON, L.F., La interacción entre Ciencia y Religión: una actualización sobre el conflicto. *InterSe-des* [online] 18 (37), 48-76 (2017).
- ARANA, J., Ciencia y Religión en la Ilustración Francesa. En Montesinos, J. y Toledo, S. (Eds.), Symposium “Ciencia y Religión de Descartes a la Revolución Francesa”, 14, 15 y 16 de Septiembre 2006, Santa Cruz de Palma, Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia: La Orotava, 2007a; pp 273-289;
- ARANA, J., Ciencia y Religión ¿Enemigas o Aliadas?, Editorial Senderos: Sevilla, 2020.
- ARANA, J., Límites de la Biología y Fronteras de la Vida, Unión Editorial: Madrid, 2014.
- ARANA, J., El proceso histórico de separación entre ciencia y filosofía, Discurso de Recepción del Académico de Número Excmo. Sr. D. Juan Arana Cañedo-Arguelles, Real Academia de Ciencias Morales y Políticas: Madrid, 2015
- ARANA, J., Temas centrales del diálogo ciencia-fe en la actualidad. *Scripta Theologica* 39(2), 479-494 (2007b).
- ASUERO, A.G., El principio de autoridad: ejemplos extraídos en el ámbito de la química. *Memorias de la Real Academia Sevillana de Ciencias* 18, 227-243 (2015).
- ASUERO, A.G., Guion de Farmacia. El espejo de la diversidad. *Boletín de la Hermandad de los Estudiantes* 22-23 (2015).
- ASUERO, A.G., Química (Analítica) y Principio de Autoridad: Anotaciones, Historias y Anécdotas, Lección Inaugural del Curso Académico 2019-2020. Editorial Universidad de Sevilla: Sevilla, 2019.
- ATTRIDGE, H.W., *The Religion and Science Debate: Why Does it Continue?* Yale University Press: Yale, 2009.
- AYALA, F.J., Ciencia y religión: ¿son compatibles? *El País*, 20 Junio 2017; [https://elpais.com/elpais/2017/05/12/ciencia/1494581585\\_827393.html](https://elpais.com/elpais/2017/05/12/ciencia/1494581585_827393.html)
- AYALA, F.J., Evolución, creación y diseño inteligente. En “Ciencia y Religión en el Siglo XXI: recuperar el diálogo”, Chuvieco, E., Alexander, D. (Eds.), Fundación Ramón Areces: Madrid, Cap. 9, pp 195-214.
- AZUMENDI, E., “Es un error común suponer que ciencia y religión son incompatibles” *El Diario* 5 Febrero 2017; [https://www.eldiario.es/euskadi/euskadi/comun-suponer-ciencia-religion-incompatibles-iglesia\\_1\\_3601235.html](https://www.eldiario.es/euskadi/euskadi/comun-suponer-ciencia-religion-incompatibles-iglesia_1_3601235.html)
- BACHILLER, R., D’ORS, P., Ciencia y Religión, *El Español*, 9 Noviembre 2018; [https://www.elespanol.com/el-cultural/opinion/dardos/20181109/ciencia-religion/351966370\\_0.html](https://www.elespanol.com/el-cultural/opinion/dardos/20181109/ciencia-religion/351966370_0.html)
- BACON, F., *The Proficiency and Advancement of Learning Divine and Human (The Advancement of Learning)*, 1605.
- BAINBRIDGE, W.S., *Religion and Science*. *Futures* 36, 1009-1023 (2004).
- BARBOUR, I.G., *El encuentro entre ciencia y religión ¿Rivales, desconocidas o compañeras de viaje?* Editorial Sal Terrae: Santander, 2004.
- BARBOUR, I.G., *Ethics in an Age of Technology: Gifford Lectures, Vol. Two*, Harper: San Francisco, 1992.
- BARBOUR, I.G., *Issues in Science and Religion*, Prentice-Hall, 1966.
- BARBOUR, I.G., *Myths, Models & Paradigms*, Harper Collins College Division, 1974.
- BARBOUR, I.G., *Religion and Science. Historical and Contemporary Issues*, SCM Press, 1998.
- BARBOUR, I.G., *Religion in an Age of Science*, SCM Press, 1990.
- BARBOUR, I.G., *Religión y Ciencia*, Editorial Trotta: Madrid, 2004.
- BARBOUR, I.G., On typologies for relating science and religion. *Zygon* 37(2), 345-360 (2002).
- BARBOUR, I.G., *When Science Meets Religion. Enemies, Strangers, or Partners?* Harper, 2000.
- BAROJA, P., *El Árbol de la Ciencia (1911)*, Alianza Editorial: Madrid, 2011.

- BARZAGHI, A., CORCÓ, J., Stephen Jay Gould and Karl Popper on science and religion. *Scientia et Fides* 4(2), 417-436 (2016).
- BAUTISTA, J.S., ESCOBAR, V.H., MIRANDA, R.C., Scientific and religious beliefs about the origin of life and life after death: validation of a scale. *Universal Journal of Educational Research* 5(6), 995-1007 (2017).
- BBC NEWS MUNDO, La idea sobre dios y la religión de 5 grandes científicos de la historia, 20 Abril 2019; <https://www.bbc.com/mundo/noticias-47950245>
- BEDE, *On the Nature of Things and On Times*. Translated with introduction, notes and commentary by Calving B. Kendall and Faith Wallis, Liverpool University Press: Liverpool, 2010.
- BELENDEZ VAZQUEZ, A., ARRIBAS GARDE, E., ¿Fue acaso un dios el que escribió estos signos? *El País Digital* 09-12-2014.
- BENFEY, O.T., The role of imagination in science. Van't Hoff inaugural address. *Journal of Chemical Education* 37(9), 467-470 (1960); Root-Bernstein, R.S., *Visual thinking: The art of imagining reality*. *Transactions of the American Philosophical Society* 75(6), 50-67 (1985).
- BERRY, R.J., *True Scientist*, True Faith, Monarch Books, 2014.
- BISHOP, G.F., Are scientists still keeping the faith?; <https://cdn.centerforinquiry.org/wp-content/uploads/sites/26/1999/04/22155938/p11.pdf>
- BOUMA, H., The tension between science and religion: are these mutually hostile disciplines? *Pure & Applied Chemistry* 71(5), 811-816 (1999).
- BOWLER, P.J., *Reconciling Science and Religion. The Debate in Early-Twentieth Century Britain*, The University of Chicago Press: Chicago, 2001.
- BOX, G.E.P., Science and statistics. *Journal of American Statistical Association* 71 (356), 791-796 (1976).
- BRANCH, G., The Warfare between Science and Religion. The idea that wouldn't. *Reading Religion*, American Academy of Religion, 4 March, 2020.
- BROOKE, J.H., *Ciencia y Religión. Perspectivas Históricas*, Editorial Sal Terrae: Santander, 2016.
- BROOKE, J.H., El inicio de la ciencia en el mundo occidental. En "Ciencia y Religión en el Siglo XXI: recuperar el diálogo", Chuvieco, E., Alexander, D. (Eds.), *Fundación Ramón Areces: Madrid*, Cap. 1, pp 13-32.
- BROOKE, J.H., Revisiting William Paley. *Zygon* 57(1), 141-160 (2022).
- BROOKE, J.H., *Science and Religion. Some Historical Perspectives*, Cambridge University Press: Cambridge, 2014.
- BROOKE, J., CANTOR, G., *Reconstructing Nature. The Engagement of Science and Religion*, A & C Black, 2000.
- BROOKE, J. H., NUMBERS, R.L., *Science and Religion around the World*, Oxford University Press: Oxford, 2011.
- CAAMAÑO, J.M., DE FELIPE, P., Del conflicto a la complejidad en la relación entre ciencia y religión: John H. Brooke, *Fronteras CTR*, *Revista de Ciencia y Religión*, 12 Enero 2017; <https://blogs.comillas.edu/FronterasCTR/?p=571>
- CAIN TRAVIS, M., *Thinking God's Thoughts. Johannes Kepler and the Miracle of Cosmic Comprehensibility*, Romana Roads Press, 2022.
- CAMARA, T., *Contestación a la Historia del Conflicto entre la Religión y la Ciencia de Juan Guillermo Draper*, 2ª ed., Galviria y Zapatero: Valladolid, 1880.
- CAMBELL, H.A., LOOY, H., *A Science and Religion Primer* (Ed.), Baker Academic: Michigan, 2009.
- CAMUS, A., *Le Mythe de Sisyphe*, Gallimard: Paris, 1943; *El Mito de Sísifo*, Editorial Losada: Buenos Aires, 1975.
- CHUVIECO, E., ALEXANDER, D. (Coord.), *Ciencia y Religión en el Siglo XXI: recuperar el diálogo*, Fundación Ramón Areces: Madrid, 2012.
- CLAYTON, P., *God and Contemporary Science (Edinburgh Studies in Constructive Theology)*, Wm. B. Eerdmans Publishing Company, 1998.

- CLAYTON, P., *Religion and Science: the Basis*, Routledge, 2011.
- CLAYTON, P., The religion-science discussion at forty years: “Reports of my death are premature”. *Zygon* 40(1), 23-32 (2005).
- COLLINS, F.S., *¿Como habla Dios? La evidencia científica de la fe*, Editorial Ariel: Barcelona, 2016.
- CORNOLDI, J., *Examen crítico de la historia de los conflictos entre la religión y la ciencia de Guillermo Draper*, Imprenta de F. Maroto é Hijos: Madrid, 1878.
- COYNE, G.V., *Faith and Knowledge: Towards a New Meeting of Science and Theology*, Librería Editrice Vaticana, 2007.
- CRANFIELD, P.F., On the origin of the phrase *Nihil est in intellectu quod non prius fuerit in sensu*. *Journal of the History of Medicine* 25, 77-80 (1970).
- CRAWFORD, R., *The God/ Man/ World Triangle. A Dialogue between Science and Religion*. MacMillan Press Ltd: Hampshire, 1997.
- CRICK, F., *Astonishing Hypothesis: The Scientific Search for the Soul*. Scribner, 1995.
- D’ALEMBERT, DIDEROT, D., *Encyclopedie ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers*, Paris, 1751.
- DAROS, W.R., Religión y ciencia en el pensamiento de Albert Einstein. *Invenio* 5(8), 12p (2002).
- DAVISON, A., Science and specificity: interdisciplinary teaching between theology, religion, and the natural sciences. *Zygon* 57(1), 233-243 (2022).
- DAWKINS, R., *El espejismo de Dios*, Espasa-Calpe, 2017.
- DAWKINS, R., *Los jinetes del apocalipsis “una conversación brillante sobre ciencia, fe, ateísmo y religión”*, Grupo Editores, 2023.
- DE CRUZ, H., A taste for the infinite: what philosophy of biology can tell us about religious belief. *Zygon* 57(1) 161-180 (2022).
- DE CRUZ, H., Believing in Dawkins: The New Spiritual Atheism. *Journal of the American Academy of Religion* 89(3), 1117-1120 (2021).
- DE CRUZ, H., Religion and Science, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2017, 2022; <https://plato.stanford.edu/entries/religion-science/>
- DE CRUZ, H., Some thoughts on the relationship between science and religion in an American context, February 17, 2021; <https://helensreflectionsblog.wordpress.com/2021/02/17/some-thoughts-on-the-relationship-between-science-and-religion-in-an-american-context/>
- DENNETT, D.C., *Romper el hechizo: la religión como un fenómeno natural*, Ed. Katz: Madrid, 2007.
- DESCARTES, R., *Règles pour la direction de l’esprit, Oeuvres de Descartes*, Victor Cousin, Levrault, 1826, Tome XI.
- DESCARTES, R., *Tratado del Hombre* (1662), Alianza Editorial: Madrid, 1991.
- DICKSON WHITE, A., *History of the Warfare of Science with Theology in Christendom*, Project Gutenberg, 2009; <https://www.gutenberg.org/files/505/505-h/505-h.htm>
- DILWORTH, D., Readers say scientists can, indeed, knock on the heaven’s door. *Physics Today* 66(1), 8 (2013).
- DIMITROV, T., *La dimensión espiritual de grandes científicos (traducido y adaptada del inglés: 50 Nobel Laureates and other great scientists who believe in God, 1995)*. Universidad Iberoamericana, México D.F., 2014.
- DIXON, T., CANTOR, G., PUMFREY, S., *Science and Religion: New Historical Perspectives*, Cambridge University Press: Cambridge, 2010.
- DRAPER, J.G., *Historia de los Conflictos entre la Religión y la Ciencia*, Imprenta, Estereotipia y Galvanoplastia de Aribau y C<sup>a</sup>: Madrid, 1876.
- DU TOIT, C.W., A scientific defence of religion and the religious accommodation of science? Contextual challenges and paradoxes. *HST Teologiese Studies/ Theological Studies* 69(1), Art#1293, 9 p (2013).
- ECKLUND, E.H., JOHNSON, D.R., *Varieties of Atheism in Science*, Oxford University Press, 2021.



- ECKLUND, E.H., PARK, J.Z., Conflict between religion and science among academic scientists? *Journal for the Scientific Study of Religion* 48(2), 276-292 (2009).
- ECKLUND, E.H., PARK, J.Z., SORRELL, K.L., Scientists negotiate boundaries between religion and science. *Journal for the Scientific Study of Religion* 50(3), 552-569 (2011).
- ECO, U., MARTINI, C.M., ¿En qué creen los que no creen? Un diálogo sobre la ética en el fin del mundo. Ed. Temas de Hoy, 1997.
- EINSTEIN, A., Ideas and Opinions, Crown Publishers: New York, 1954; pp 36-40.
- EINSTEIN, A., Religion and Science, *The New York Times*, November 9, 1930.
- EINSTEIN, A., Science and religion. *Nature* (3076) 605-607 (1940).
- EINSTEIN, A., *The World as I see It*, Philosophical Library: New York, 1949; pp 24-28.
- ESPINOSA CIFUENTES, E., Saber y creer: reflexiones acerca de la relación entre la ciencia y la fe. *Enfoques* 13 (1-2), 33-39 (2001).
- ESTEVA DE SAGRERA, J., La navaja de Ockam. *Offarm* 25(6), 9 (2006).
- EUROPA PRESS SOCIEDAD, Humanistas y científicos defienden el diálogo entre ciencia y religión para alcanzar “el entendimiento común”, 2 Octubre 2020.
- EVANS, J.H., EVANS, M.S., Religion and Science: beyond the epistemological conflict narrative. *Annual Reviews of Sociology* 34, 87-105 (2008).
- FARADAY INSTITUTE for Science and Religion, Physics and Psalms, December 17, 2010; <https://www.faraday.cam.ac.uk/churches/church-resources/posts/172/>
- FERRAGUD, C., FLORENSA, C., Ciencia y religión: ¿la historia de un conflicto? *Sabers en Acció*, 5 Abril 2021.
- FERNGREN, G.B.(Ed.), *Science and Religion: a historical introduction*, Johns Hopkins University Press, 2002.
- FERREIRA, V. de Sá, SALES, R. de, Confluências filosóficas para os estudos de classificação das artes: aproximações de Bacon, Hegel e Harris. *Scire* 24(1), 55-65 (2018).
- FLORIO, L., Las tipologías de la relación entre ciencia y religión. Su valor para la teología y para la pedagogía religiosa. *Horitzó - Revista de Ciències de la Religió* 1(2), 63-76 (2020).
- FRANCO VELEZ, M., Ciencia y Religión, tan cerca y tan lejos, *Viva la Ciencia*, Divulgación Minciencias, 1 Noviembre 2018; <https://divulgacion.minciencias.gov.co/ciencia-y-religion>
- GAITHER, C.C., CAVAZOS-GAITHER, A.E., *Gaither's Dictionary of Scientific Quotations*, 2<sup>nd</sup> ed., Springer: New York, 2012, p. 2192
- GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*. F. Dominicus Paulaccius: Roma, 1623.
- GIBERSON, K., ARTIGAS, M., *Oráculos de la Ciencia. Científicos famosos contra Dios y la religión*, Ediciones Encuentro, 2012.
- GIMENEZ AMAYA, J.M., ¿Cómo son las relaciones entre la fe y la ciencia en la actualidad?, Grupo Ciencia, Razón y Fe, Universidad de Navarra.
- GOETHE, J.W. VON, *Faust*, Ludwig Wilhelm Hasser, 1888, p. 42.
- GOULD, S.J., *Ciencia Versus Religión – Un Falso Conflicto*, Crítica: Barcelona, 2000.
- GRIERA, M. M., *Religión y ciencia: una batalla irresoluble*, Oficina de Asuntos Religiosos. Cultura, Educación, Ciencia y Comunidad, Ajuntament de Barcelona; [https://ajuntament.barcelona.cat/oficina-afers-religiosos/es/noticia/religion-y-ciencia-una-batalla-irresoluble\\_1078473](https://ajuntament.barcelona.cat/oficina-afers-religiosos/es/noticia/religion-y-ciencia-una-batalla-irresoluble_1078473)
- HALDANE, J., *Scotland's Gift: Philosophy, Theology and the Gifford Lectures*. *Theology Today* 63, 469-476 (2007).
- HARDIN, J., NUMBERS, R.L., BINZLEY, R.A. (Eds.), *The Warfare between Science and Religion: The Idea That Wouldn't Die*, University Johns Hopkins Press, 2018.
- HARRIS, S., *El fin de la fe. Religión, terror y el futuro de la razón*, Ed. Paradigma, 1970.
- HARRISON, P. (Ed.), *Cuestiones de Ciencia y Religión. Pasado y Presente*, Sal Terrae- U.P. Comillas: Santander, 2017.
- HARRISON, P., *Los territorios de la ciencia y la religión*, Sal Terrae-U.P. Comillas, Maliaño-Madrid, 2020.

- HARRISON, P., Porqué la ciencia nunca acabará con la religión, *El Mundo*, 9 Octubre, 2017; <https://www.elmundo.es/papel/cultura/2017/10/09/59d60b1ee2704e9a438b45fa.html>
- HARRISON, P. (Ed.), *The Cambridge Companion to Science and Religion*, Cambridge University Press, 2010
- HARRISON, P., “Science” and “Religion”: constructing the boundaries. *The Journal of Religion* 86(1), 81-106 (2006).
- HARRISON, P., What is natural theology? (and should we dispense with it?). *Zygon* 57(1) 114-138 (2022).
- HARRISON, P., NUMBERS, R.L., SHANK, M.H., *Wrestling with Nature. From Omens to Science*, The University of Chicago Press: Chicago, 2011.
- HAYES, B., Undisciplined Science. *American Scientists* 2004, 92(4), 306-310.
- HENSON, God and Natural Order. *Physics, Philosophy, and Theology*, Routledge: New York y Oxon, 2014.
- HILDEBRAND, U., “Das Universum - Hinweis auf Gott?”, in *Ethos (die Zeitschrift für die ganze Familie)*, No. 10, Oktober. Berneck, Schweiz: Schwengel er Verlag AG, 1988.
- HITCHENS, C., Dios no es bueno. Alegato contra la religión, Ed. Debate: Barcelona, 2008.
- HOFFMANN, R., MINKIN, V.I., CARPENTER, B.K., Ockham’s razor and chemistry. *HYLE Int. J. Phil. Chem.* 3, 3-18 (1997); *Bulletin de la Société Chimique de France* 133, 117-130 (1996).
- HORNER, D., Remembering to remember: the stories of God’s people. *Biliba*, September 26, 2018; <https://www.biblica.com/articles/remembering-to-remember-the-stories-of-gods-people/>
- HUNTER, W., Calibration and the straight line: current statistical practices. *Journal of Association of Official Analytical Chemists* 64, 574-583 (1981), p. 582.
- IRANZO DOSDAD, A., MANRIQUE, C., Rethinking the relation between science and religion: some epistemological and political implications. *Revista de Estudios Sociales* 51, 258-266 (2015).
- JALALI-HERVAY, M., ARRASTRA, M., GÓMEZ, F.A., How chemometrics improve microfluidic research. *Analytical Chemistry* 87(7), 3544-3555 (2015).
- JESTER, C.L., *On Science and Atheism: whether Atheistic belief is Scientifically Motivated*, Thesis, Baylor University, Waco, Texas, 2015.
- JIMENEZ, J.R., *Dios deseante y deseado (Animal de fondo)*, Akal: Madrid, 2008.
- JIMENEZ, J.R., *Lírica de una Atlántida*, Galaxia Gutenberg/ Círculo de Lectores, 1999.
- JOHNSON, C., LYNNE, C., FUNK, C., On the intersection of science and religion, *Per Trend Magazine*; <https://www.pewtrusts.org/en/trend/archive/winter-2021/on-the-intersection-of-science-and-religion>
- JUAN PABLO II, *Fides et Ratio. La Fe y la Razón*, San Pablo: Madrid, 1998.
- KALMAN, C.S., Science and religion, separate pursuits. *Physics Today* 66(9), 10 (2013).
- KELLER, G.E., What is the Relationship between Science and Religion? Center for Science & Religion, Stanford University.
- KELVIN, LORD, Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light. *Philosophical Magazine* S6, 2(7) 1-40 (1901).
- KLEIN, F., *Neue Beiträge zur Frage des mathematischen und physikalischen Unterrichts an den höheren Schulen Vorträge gehalten bei Gelegenheit des Ferienkurses für Oberlehrer der Mathematik und Physik, Göttingen, Ostern 1904. Parte 1*
- KORNBERG, A., *For the Love of Enzymes. The Odyssey of a Biochemist*, Harvard University Press: Harvard, 1989.
- KORNBERG, A., The two cultures: chemistry and biology. *Biochemistry* 26, 6888-6891(1987).
- KUHN, T., *The structure of scientific revolutions*, University of Chicago Press: Chicago, 1962.
- KURTZ, P., *Science and Religion. Are they compatible?* Prometheus, 2010.
- LARSON, E.J., WITHAM, L., Scientists are still keeping the faith. *Nature* 386, 435-436 (1997).
- LASZLO, E., Religion versus science: the conflict in reference to truth value, not cash value. *Zygon* 40(1), 57-61 (2005).

- LAVOISIER, A.L., *Tratado Elemental de Química*. Introducción, traducción y notas de Ramón Gago Bohórquez, Ed. Alaguara, 1982.
- LAWRYNOWICZ, J., POLATOGLOU, H.M., *Great physicists' direct conversation with God through their scientific research*. Konferenzia ChFPN Nauka-Etyka-Wiara 2013, Rydzyna 30.05-2.06.2013, 229-248.
- LECOMTE DU NOÛY, P., *De la Ciencia a la Fe*, Ediciones Guadarrama: Madrid, 1969.
- LEMAÎTRE, G., *The beginning of the world from the point of view of quantum theory*. *Nature* 127 (3210) 706 (1931).
- LENNOX, J.C., *¿Ha enterrado la Ciencia a Dios?*, Editorial Rialp: Madrid, 2019.
- LENNOX, J.C., *¿Puede la ciencia explicarlo todo?*, Editorial CLIE, 2021.
- LIGHTMAN, B. (Ed.), *Rethinking History, Science, and Religion: An Exploration of Conflict and the Complexity Principle*, University of Pittsburgh Press: Pittsburgh, 2019.
- LIVINGSTONE, D.N., *Which Science? Whose Religion?* En "Science and Religion Around the World", Brooke, J.H., Numbers, R.L. (Eds.), Oxford University Press: Oxford, 2011; pp 278-296.
- LORRIMAR, V., *Does an inkling belong in science and religion? Human consciousness, epistemology and the imagination*. *Zygon* 57(1), 244-266 (2022).
- MARTI, O., "Los hombres se inventan dioses para no mirar la realidad", *El País*, 18 Marzo 2006; [https://elpais.com/diario/2006/03/18/babelia/1142641028\\_850215.html](https://elpais.com/diario/2006/03/18/babelia/1142641028_850215.html)
- MATTHEWS, M., *Debate about science and religion continues*. *Physics Today* 60(2), 10 (2007).
- McCANN, Georges Lemaître: the priest who proposed the 'Big Bang'. *Studies* 105 (418)
- McGRATH, A.E., *La Ciencia desde la Fe*, Espasa: Barcelona, 2016.
- McGRATH, A.E., *Response: science and religion – the state of the art*. *Zygon* 57(1) 267-285 (2022).
- McGRATH, *Science & Religion. A new introduction*, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley-Blackwell: New York, 2009.
- McGRATH, *Una visión enriquecida de la realidad. El diálogo entre la teología y las ciencias naturales*, Editorial Sal Terra-U.P. Comillas, Maliaño (Cantabria), 2019.
- McLEISH, T., *Thinking differently about science and religion*. *Physics Today* 71(2), 10-12 (2018).
- MEDIAVILLA, D., "Hay una colisión inevitable entre ciencia y religión", *El País*, 10 abril 2017.
- MILLER, K.R., *Finding Darwin's God: A Scientist's Search for Common Ground Between God and Evolution*, Cliffs Street Books, 1999.
- MILTON, J., *Paradise lost. A poem in ten books*, Samuel Simmons, 1667.
- MIRAS, J., TRIGO, T. (Eds.) *50 Preguntas sobre la Fe ¿cómo son las relaciones entre la fe y la ciencia en la actualidad?* <https://www.arguments.es/50-preguntas-fe/pdf/fe17.pdf>
- MONOD, J., *Le Hasard et la Nécessité, Essay sur la philosophie naturelle de la biologie modern*, Seuil, 1970.
- MONTERRAT, J., *Ciencia y religión, dos visiones del mundo*. *Anales de Mecánica y Electricidad* 49-53, Agosto (2010); [https://www.tendencias21.es/Ciencia-y-religion-dos-visiones-del-mundo\\_a4260.html](https://www.tendencias21.es/Ciencia-y-religion-dos-visiones-del-mundo_a4260.html)
- MORRISON, D., *Debate about science and religion continues*. *Physics Today* 60(2), 10 (2007).
- NASETTI, E., *Il Lato Oscuro di Marte – Dal Mito Alla Colonizzazione*, Ed. Digital, 2018.
- NATIONAL ACADEMIES, *Science and religion*; <https://www.nationalacademies.org/evolution/science-and-religion>
- NEWTON, I., *Cuatro cartas de Sir Isaac Newton al Doctor Bentley que contienen algunos argumentos en favor de la existencia de una deidad (1692-1693)*. Introducción, traducción y notas de Hermes H. Benítez. *Revista de Filosofía Diánoia* 44, 113-135 (1998).
- NOWAK, M., COAKLEY, S., *Evolution, Games and God. The Principle of Cooperation*, Harvard University Press: Harvard, 2013.
- NUMBERS, R.L., *Galileo goes to jail and other myths about Science and Religion*, Harvard University Press: Harvard, 2009.
- ORTI Y LARA, J.M., *La Ciencia y la Divina Revelación*, Tipografía Guttenberg: Madrid, 1881.

- OSLER, M.J., Mixing metaphors: science and religion or natural philosophy and theology in early modern Europe. *History of Science* 36(1), 91-113 (1998).
- PALEY, W., *Natural Theology*, American Tract Society: New York, 1803.
- PALMER, B.V., *Science and God: Enemies or Allies?* Austin Macauley Publishers, 2023.
- PEACOCKE, A., *Theology for a Scientific Age. Being and Becoming – Natural, Divine, and Human*, Augsburg Fortress, 1993.
- PEREZ CASTELLS, J. (Coord.), *La Ciencia contra Dios. Las preguntas claves en ciencia y fe*, Digital Reasons, 2021.
- PESHKIN, M., Addressing the public about science and religion. *Physics Today* 59(8), 46-47 (2006).
- PINSEN, A., Alister McGrath and education in science and religion. *Zygon* 57(1), 223-232 (2022).
- PIPPARD, A.B., The Cavendish Laboratory. *European Journal of Physics* 8, 231-235 (1987).
- PLANTINGA, A., *Where the Conflict Really Lies. Science, Religion & Naturalism*, OUP USA, 2012.
- POLKINGHORNE, J., *Belief in God in an Age of Science*, Yale University Press: Yale, 1998.
- POLKINGHORNE, J., The continuing interaction of science and religion. *Zygon* 40(1), 43-50 (2005).
- POLKINGHORNE, J., *Science and Religion in Quest of Truth*, Yale University Press: Yale, 2012.
- PRIETO SANTANA, M.D., Ciencia y Religión: un debate que sigue vivo. *Fronteras CTR*, Revista de Ciencia, Tecnología y Religión; <https://blogs.comillas.edu/FronterasCTR/?p=6346>
- RAE, *Diccionario de la Lengua Española*; <https://dle.rae.es>
- RECIO, G., Harrison Peter: los territorios de la ciencia y la religión, reseña. *Sapientia*, Julio-Diciembre 75 (246), 287-296 (2019).
- REMOLINA VARGAS, G., Ciencia, Filosofía y Fe en el debate contemporáneo. *Filósofos y científicos ateos y creyentes ante el problema de Dios*. *Universitas Philosophica* 26(52), 165-194 (2009).
- ROBINSON, J., *The Science and Religion Forum: a short history*, 2012 SRF Conference volume “The Concept of the Soul”.
- RODRIGUEZ PETERSEN, F., Entre la ciencia y religión ¿hay sitio para Dios? *Gente*, noviembre 10, 2019; <https://www.gente.com.ar/actualidad/ignacio-silva-ciencia-y-religion-hay-sitio-para-dios/>
- ROUX, I., Ciencia y religión (3 p); <https://xdoc.mx/documents/ciencia-y-religion-5f10c498a53ba>
- RUBAL, P., Breve historia de la inquietud científica por lo religioso, *Tendencias Ciencia Tecnología e innovación*, 13 Noviembre, 2012; [https://tendencias21.levante-emv.com/breve-historia-de-la-inquietud-cientifica-por-lo-religioso\\_a14180.html](https://tendencias21.levante-emv.com/breve-historia-de-la-inquietud-cientifica-por-lo-religioso_a14180.html)
- RUBIO Y ORS, J., *Los supuestos conflictos entre la Religión y la Ciencia o sea la obra de Draper ante el tribunal del sentido común, de la razón y de la historia*, Tipografía Gutenberg: Madrid: 1981.
- RUSE, M., The Dawkins challenge. *Zygon* 57(1), 181-198 (2022).
- RUSSELL, B., *La Perspectiva Científica*, Editorial Ariel: Barcelona, 1969.
- RUSSELL, B., *Religión y Ciencia*, Fondo de Cultura Económica: México, 1951.
- SALOM, S., *Poetas turcos contemporáneos*, Rialp, 1959.
- SALOMONE, M., ¿Dios creó al hombre o el hombre creó a Dios? *El País*, 19 mayo 2008; [https://elpais.com/diario/2008/05/20/sociedad/1211234401\\_850215.html](https://elpais.com/diario/2008/05/20/sociedad/1211234401_850215.html)
- SANCHEZ CAÑIZARES, J., The Religion and Science Debate why It Continue? (Harold W. Attridge (ed.). *Anuario Filosófico* 43(1), 185-187 (2010); <https://www.eastsidelutheran.org/pastors-blog/2021/01/30/faith-and-science-a-false-conflict/>
- SCHAEFER, D.O., The territories of thinking and feeling rethinking religion, science, and reason with Alister McGrath. *Zygon* 57(1), 200-221 (2022).
- SCHLICHT, P., Eastside Lutheran, Church & School, Faith and Science: A False Conflict (Part 1 of 4); <https://www.eastsidelutheran.org/pastors-blog/2021/01/30/faith-and-science-a-false-conflict/>
- SCHNECK, M.C., Incompatibility of science and religion. *Phys. Today* 61(5), 10 (2008).
- SCHOFIELD, K., Can a scientists knock on heaven’s door. *Phys. Today* 65(8), 12 (2012).
- SCHROEDER, G.L., *The Science of God: the Convergence of Scientific and Biblical Wisdom*, 2009.
- SEQUEIROS SAN ROMAN, L., Recensión de la obra Harrison, P., *Los territorios de la ciencia y la religión*, Ed. Sal Terrae, 2020. *Revista de fomento social*, 160-164 (2020); <http://dx.doi.org/10.32418/rfs.2020.296.3321>

- SHAPIN, S., *The Scientific Life: A Moral History of a Late Modern Vocation*, Chicago University Press: Chicago, 2008.
- SIEGEL, R.M., CALLAWAY, E.M., Francis Crick's legacy for neuroscience: between the and the . *Plos Biology* 2(12) 2029-2032 (2004).
- SILVA, I., EN 1ª Conferencia Internacional de Cultura Científica. Mesa Redonda Ciencia y Religión (Matías Libedinsky, Horacio Croxatto, Jorge Wagenberg, Diego Golombek, Ignacio Silva), Universidad Andrés Bello: Santiago de Chile, 9 de Octubre de 2013 (YouTube).
- SILVA, I., *Providencia y acción divina*. Diccionario Interdisciplinar Austral, 2017.
- SMEDES, T.A., *How to Relate Science and Religion: A Multidimensional Model* by Mikael Stenmark. *Ars Disputandi* 5 (2005).
- SOLANO, E., Preguntas y respuestas en la relación Ciencia-Fe. En: *La acción social de la Iglesia: XIX Congreso Católicos y Vida Pública*, Madrid, 17,18 y 19 de noviembre de 2017, CEU Ediciones: Madrid, 2018; pp 435-544.
- SOLLEREDER, B., Introduction to essays in honor of Alister McGrath. *Zygon* 57(1), 109-113 (2022).
- STEINHART, E., *Believing in Dawkins. The New Spiritual Atheism*. Palgrave macmillan, 2020.
- STENMARK, M., *How to Relate Science and Religion*, William B. Eerdmans: Cambridge, 2004.
- STENMARK, M. How to relate science and religion a multidimensional model. *International Journal for Philosophy of Religion* 58(1), 55-58 (2005).
- STIRRAT, M., CORNWELL, R.E., Eminent scientists reject the supernatural: a survey of the Fellows of the Royal Society. *Evolution: Education and Outreach* 6, 33 (5 p) (2013).
- TANZELLALA-NITTI, G., COLAGÈ, I., STRUMIA, A., *Interdisciplinary Encyclopedia of Religion and Science* INTERS (inters.org) ISSN 2037-2329.
- TEILHARD DE CHARDIN, P., *El fenómeno humano*, Taurus Ediciones, S.A.: Madrid, 1965.
- TEILHARD DE CHARDIN, P., *El medio divino*, 6ª ed., Taurus Ediciones, S.A.; Madrid, 1967.
- THE CAVENDISH LABORATORY, 4. Professor and Laboratory; [http://www.cambridgephysics.org/laboratory/laboratory4\\_1.htm](http://www.cambridgephysics.org/laboratory/laboratory4_1.htm)
- THORPE, W.H., *Ciencia, hombre y moral*, Labor: Barcelona, 1967.
- TORRANCE, R.M., QUINGLES, J., *La búsqueda espiritual. La trascendencia en el mito, la religión y la ciencia*. Siruela, 2006.
- TREJO BASTIDAS, O., ¿Por qué religión y ciencia no van de la mano?, *Viva la Ciencia*, *Divulgación Minciencias*, 10 Noviembre 2018; <https://divulgacion.minciencias.gov.co/opinion/por-que-religion-y-ciencia-no-van-de-la-mano>
- TUCKER, C.M., IVAKHIV, A.J., *Intersections of Nature, Science and Religion. An Introduction*, Chap. 1, 21 pp. En *Nature, Science and Religion: Intersections Shaping Society and the Environment*, Tucker, C.M. (Ed.), SAR Press.
- UDÍAS VALLINA, A., *Ciencia y religión: dos visiones del mundo*, Editorial Sal Terrae: Santander, 2012.
- UDÍAS VALLINA, A., *Conflicto y Diálogo entre Ciencia y Religión*, Pontificia Universidad Católica del Perú, Editorial Sal Terrae: Santander, 2000.
- VALIENTE BARROSO, C. (Coord.), *13 académicos ante el diálogo ciencia-fe. Religión y ciencia interdisciplinar*, Editorial Síntesis: Madrid, 2014.
- VANNEY, C., SILVA, I., *Ciencia y Religión*. En *Diccionario Interdisciplinar Austral*, Vanney, C.E., Silva, I., Frank, J.F. (Eds.), 2019; [http://dia.austral.edu.ar/Ciencia\\_y\\_religion](http://dia.austral.edu.ar/Ciencia_y_religion)
- VAN'T HOFF, J., *Imagination in Science (1878)*, Lleinseller A., Springer, F.F., Wittman, H.G. (eds.). Translated into English with notes and a general introduction by G.F. Springer, Springer-Verlag, New York, 1967, 18 pp; *Resonance* 12(5), 88-100 (2007).
- VAZQUEZ VAAMONDE, A.J., *Ciencia y Religión: un análisis de la razón versus la fe*. *Encuentros Multidisciplinares* 38, 1-8 (2011).
- VIDA ACADÉMICA, *Ciencia y fe son absolutamente compatibles*, UNIR, *La Universidad en Internet*; <https://www.unir.net/actualidad/vida-academica/ciencia-y-fe-son-absolutamente-compatibles/>

- VIDA NUEVA DIGITAL, Javier Sánchez: “El gran problema en el diálogo entre ciencia y religión es el lenguaje, entendernos unos a otros”; <https://www.vidanuevadigital.com/2020/07/17/javier-sanchez-el-gran-problema-en-el-dialogo-entre-ciencia-y-religion-es-el-lenguaje-entendernos-unos-a-otros/>
- VIDALA, A., VAINIO, O-P., Philosophy of religion and the scientific turn. Palgrave Communications 4, 135 (8 p) (2018).
- WALLACE, A., Religion: an Anthropological View, Random House: New York, 1966.
- WHEWELL, W., Astronomy and General Physics considered with reference to Natural Theology. William Pickering: London, 1833; Dedication, vi.
- WIKIPEDIA, Conferencias Terry; [https://es.wikipedia.org/wiki/Conferencias\\_Terry](https://es.wikipedia.org/wiki/Conferencias_Terry)
- WIKIPEDIA, Gifford Lectures; [https://en.wikipedia.org/wiki/Gifford\\_Lectures](https://en.wikipedia.org/wiki/Gifford_Lectures)
- WIKIPEDIA, List of Christian Nobel Laureates; [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_Christian\\_Nobel\\_laureates](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Christian_Nobel_laureates)
- WIKIPEDIA, Premio Templeton; [https://es.wikipedia.org/wiki/Premio\\_Templeton](https://es.wikipedia.org/wiki/Premio_Templeton)
- WIKIPEDIA, Relación entre Ciencia y Religión; [https://es.wikipedia.org/wiki/Relación\\_entre\\_ciencia\\_y\\_religión](https://es.wikipedia.org/wiki/Relación_entre_ciencia_y_religión)
- WHITEHEAD, A.N., Science and the Modern World, Lowel Lectures, 1925, The Free Press: New York, 1925; Chap. XII, pp 224-239.
- YEGGE, J.G., A Historical analysis of the relationship of faith and science and its significance within education, PhD Thesis, Walden Dissertations and Doctoral Studies, Walden University, 2014.
- ZANATTA, A., ZAMPIERI, F., BASSO, C., THIENE, G., Galileo Galilei: science vs. faith. Global Cardiology Science & Practice 2017: 10; <https://doi.org/10.21542/gcsp.2017.10>
- ZYMAN, J., Knowing everything about nothing. Specialization and change in scientific careers, Cambridge University Press: Cambridge, 1988.
- ZUBIRI, X., Naturaleza, Historia, Dios, Alianza Editorial-Fundación Xavier Zubiri, 2007; Introducción al Problema de Dios pp 395-416: En Torno al Problema de Dios, pp 417-454.
- ZUBIRI, X., Sobre la Religión, Alianza Editorial-Fundación Xavier Zubiri: Madrid, 2017.

***“El primer sorbo de la copa de la ciencia te vuelve ateo, pero en el fondo del vaso Dios te está esperando.”***

[Original: “*Der erste Trunk aus dem Becher der Naturwissenschaft macht atheistisch, aber auf dem Grund des Bechers wartet Gott.*”] (Heisenberg, citado en Hildebrand 1988, p. 10).

***LOS MARTES DE LA ACADEMIA***





## **TRAS EL RASTRO DE LA INVISIBILIDAD: ÁTOMOS, TRAZOS Y PALABRAS**

*Conferencia pronunciada por  
Ilmo. Sr. D. Agustín Rodríguez González-Elipe,  
dentro del ciclo “Los martes de la Academia”,  
el día 8 de marzo de 2022.*

Una característica típica del trabajo científico es el desarrollo de un lenguaje capaz de describir y formalizar los resultados experimentales en el marco de modelos teóricos. En general, este lenguaje tiene patrones y reglas propios, específicos para cada disciplina científica, que, aunque en muchos casos en procedimientos matemáticos, hace también uso de conceptos, términos y palabras tomados del lenguaje ordinario. En este caso, adaptando su significado a las pautas que dicta la disciplina científica de que se trate. Es curioso que este uso interesado de términos y conceptos del lenguaje ordinario puede darse en dirección contraria, de forma que expresiones científicas se usen, en viaje de vuelta, para vivificar otros tipos de lenguajes y actividades humanas. El impacto mediático de la pasada pandemia es un vivo ejemplo de esta vivificación mutua con términos como “doblegar la curva”, alcanzar el máximo, la pendiente de la curva, inmunización y muchas otras que, de ser específicas de la estadística o de la inmunología, se han hecho comunes en el lenguaje ordinario o, por lo menos, periodístico.

La *invisibilidad* es uno de esos conceptos de ida y vuelta que se usan tanto en el campo de la ciencia, como en el arte o la literatura. El propósito de esta presentación es ilustrar esta mutua interrelación con el concepto (y la palabra) de *invisibilidad*. Aunque no se va a tratar aquí de forma extensa, conviene mencionar aquí que la “invisibilidad” es también objeto de manipulación interesada en el campo de las relaciones sociales y económicas, donde personas, grupos sociales o incluso naciones se hacen invisibles para el resto de población, diríamos que no dejan huella o, simplemente, no se quieren visualizar para no tenerlas en cuenta en las grandes decisiones económicas o políticas.

Según la RAE, en el lenguaje ordinario la invisibilidad se define como “cualidad de invisible”, teniendo este adjetivo dos acepciones: i) “que no puede ser visto” o ii) “que rehúye ser visto”.

La cultura popular, muchas veces más sensible e imaginativa que la cultura reglada y académica, ha reflejado de forma muy explícita hasta qué punto la invisibilidad, en las dos acepciones que hemos considerado, es atractiva para el imaginario moderno. En la serie de películas de la saga STAR TRECK, una cualidad de la nave espacial “Enterprise” era la de hacerse invisible. Un elemento o instrumento mágico

en la serie de libros y de películas de HARRY POTTER, de J.K Rowling, es la capa de la invisibilidad que, puesta a modo de protección o abrigo, hacía invisible la parte del cuerpo cubierta. El efecto del anillo mágico en la saga de EL SEÑOR DE LOS ANILLOS, de Tolkien, es hacer invisible a quien se lo ponga. En todos estos casos, la invisibilidad es una prerrogativa activada a voluntad. Conviene notar, sin embargo, que, según estos relatos, activar la cualidad de la invisibilidad de forma reiterada entraña un efecto adictivo pernicioso, transformando el carácter de los personajes como en el caso de *Gollum* y *Frodo* en esta última serie de relatos. Como veremos más adelante, la literatura moderna más reglada y académica ha sido también sensible a este impacto negativo de la invisibilidad.

En nuestro ámbito cultural el concepto de invisibilidad está perfectamente incardinado y vinculado al desarrollo de las religiones monoteístas, donde un atributo de la divinidad y todo lo relacionado con la misma es la de ser invisible. La cultura clásica, griega o romana, tampoco se extrañaba de que la invisibilidad fuera un atributo común del mundo exterior. El progreso científico, contrariamente a la religión y a la filosofía clásica, ha sentido como un desafío constante el desvelar lo invisible. Podría decirse que, en cierto sentido, los avances científicos más decisivos han seguido la estela de lo invisible y el desarrollo de procedimientos capaces de transponer en imágenes las cualidades de los objetos investigados.

### ***DESVELANDO LA INVISIBILIDAD DE LO PEQUEÑO: EL MICROSCOPIO***

Quizás el instrumento más crucial en el intento de desvelar lo invisible haya sido el microscopio óptico, un instrumento capaz de visualizar los objetos pequeños que, hasta su invención y uso sistemático, habían pasado desapercibidos por “invisibles”.

La historia del microscopio óptico constituye una aventura apasionante que tuvo una incidencia extraordinaria no sólo en el desarrollo científico, posibilitando la observación de lo pequeño, sino en otras muchas actividades artísticas y literarias. Ni en los mundos griegos o romanos de la antigüedad, ni durante toda la Edad Media, se imaginó la existencia de un mundo más pequeño que el directamente accesible a nuestros órganos de visión. Aunque se conservan algunos relatos clásicos de cómo al mirar a través de piedras preciosas se podía visualizar mejor ciertos objetos (Séneca relata cómo Nerón observaba las luchas de gladiadores mirando a través de una esmeralda), fue sólo a finales del siglo XVI cuando Leonardo da Vinci relaciona las ventajas de visualizar objetos pequeños a través de cristales tallados (lentes). No está claro si la invención del microscopio propiamente dicho fue obra de Galileo Galilei (1609) o del holandés Zacharias Jansen (1590) como resultado de invertir la agrupación de las lentes de un telescopio (después me referiré al invento del telescopio para visualizar los objetos grandes, pero alejados). Sea como fuere, ese microscopio incipiente permitía amplificar las imágenes no más de unas diez veces.

Se considera al holandés, nacido en Delft en 1632, *Anton Van Leeuwenhoek* como el verdadero inventor del microscopio, de forma que, modificando y mejorando su di-

seño, consiguió aumentos del orden de cientos de veces. Leeuwenhoek visitó ópticas y talladuras de vidrio donde aprendió las técnicas de soplado y tallado de este material. Además, para mejorar las aleaciones con las que se construía la parte mecánica del instrumento, consultó alquimistas y boticarios, de quienes aprendió los secretos de la extracción y manipulación de metales. Gracias a todas estas innovaciones y mejoras, el microscopio de *Anton Van Leeuwenhoek* consiguió apreciar detalles del mundo material hasta entonces nunca vistos y que ponían de manifiesto la existencia de un mundo hasta entonces ignorado (invisible) en el que cabía la constatación y visualización de pequeños seres animales o vegetales o la visualización de la estructura de maderas y otros objetos semejantes. A lo largo del siglo XVII, otros investigadores como *Federico Cesi* y *Francesco Stelluti*, *Robert Hooke* o *Marcello Malpighi* publicaron diversas observaciones microscópicas sobre abejas, el corcho o la circulación de glóbulos rojos en las orejas de un conejo. El gran impacto de sus observaciones sobre clasificación animal, vacuolas en células, fibras musculares o la estructuras sobre los granos de café fueron reconocidos en su momento e impulsaron el progresivo desarrollo y la incorporación de mejoras en el microscopio óptico que, ganando en capacidad de magnificación, dio un vuelco en la percepción del mundo de los hombres cultos de la época. Como veremos de inmediato este vuelco no se produjo sin reticencias.

Quizás el trabajo más parecido a la actividad del divulgador científico de nuestros días, fuese en el siglo XVII la obra de *Robert Hooke*, quien plasmó en su libro "*Micrographia: o algunas descripciones fisiológicas de cuerpos diminutos*" el impacto de estos primeros descubrimientos basados en la observación microscópica del mundo natural. Reconocido con el nombre de *Micrographia*, este libro constituyó una especie de "best-seller" de la época con un gran impacto dentro y fuera del ámbito puramente científico, influyendo tanto en la literatura como en la filosofía.

Contrariamente a lo que podría parecer a una mentalidad racional de base empírica propia de nuestro tiempo, la constatación de que había un mundo "invisible", por lo pequeño e inaccesible de su tamaño, no tuvo siempre un impacto positivo sobre el imaginario de los hombres cultos del siglo XVII. En general, las reacciones reflejaron incredulidad o, directamente rechazo, una actitud que a lo largo de la historia ha resultado ser bastante general cuando se ha tratado de desvelar lo que se oculta tras lo invisible. En el caso de "*Micrographia*", un contemporáneo de *Robert Hooke*, *Thomas Shadwell* escribió en su "*The Virtuoso*" refiriéndose a un miembro de la "Royal Society", que se trataba de "un borrachín que se gastaba dos mil libras en microscopios para determinar la naturaleza de las anguilas en el vinagre y de los ácaros y gusanos en el queso ... y nunca se preocupaba de entender al ser humano". En esta misma línea de recelo sobre lo pequeño, el más conocido *Jonathan Swift*, en su obra *Los viajes de Gulliver*, una novela todavía influyente como relato popular del siglo XXI, se queja de que al llegar el protagonista al país de los gigantes y poder visualizar lo que antes no le resultaba perceptible, sintió una gran repulsión al apreciar los defectos de la piel de aquellos seres enormes. En esta encrucijada Gulliver, transformado en una especie de microscopio humano, reflexiona sobre que "... la piel suave de nuestras señoritas inglesas nos parecen

tan atractivas porque son de nuestro mismo tamaño ... sus defectos no se nos harían visibles sino mirando a través de un cristal de aumento”.

Así mismo, el racionalista *Voltaire*, en su relato *Micromegas*, quizás la primera novela del género de la ciencia ficción de la que se tiene constancia, presenta la llegada a la Tierra de un gigante de este nombre de 450 años de edad y 37 km de alto. *Micromegas* había sido expulsado de un planeta que orbita alrededor de la estrella “Sirius” por escribir un libro considerado herético sobre los insectos que, según el relato, teniendo un tamaño de 30 m, eran demasiado pequeños para ser detectados por un microscopio ordinario. Con otro gigante del planeta “Saturno”, *Micromegas* encuentra en la Tierra a los minúsculos humanos a los que, debido a su pequeño tamaño, no considera inteligentes. Sin embargo, tras varios contactos, *Micromegas* se sorprende de que unos seres tan minúsculos pudieran ser sujetos de raciocinio y producir una ciencia y una filosofía (y prejuicios) muy semejantes a las que conocía en su mundo. Resulta de estas apreciaciones de *Voltaire* que las capacidades de percepción y acción aumentadas de *Micromegas* no lo hacían más sabio o racional, tal y como ocurría con algunos microscopistas y científicos de su época sobre los que se puede intuir un desdén implícito.

Esta fascinación e inicial rechazo de la posibilidad de visualizar lo pequeño se fue transformando con el tiempo en una apreciación positiva, de forma que lo invisible por pequeño llegó a ser algo real y tangible con lo que se podía incluso interaccionar. Seguramente, el inicio de la observación y caracterización celular a lo largo del siglo XIX y las consecuencias positivas de la misma tuvieron mucho que ver en este cambio de tendencia. Habían pasado cerca de 200 años desde los trabajos iniciales de *Van Leeuwenhoek* cuando autores como *Charles Dickens*, *Georges Eliot* (seudónimo de Mary Ann Evans) y otros escritores se hacen eco de este cambio de tendencia y percepción, situando ocasionalmente al microscopio en el centro de sus obras de ficción. Un ejemplo paradigmático es la novela de *Fritz-James O'brien* titulada “La lente de diamante”, donde el personaje central descubre a una mujer fascinante de tamaño diminuto en una gota de agua que observa a través de un microscopio. Su obsesión por esta mujer admirable termina trágicamente cuando, por un descuido, la gota de agua se seca y la mujer admirable sufre una muerte terrible. Más allá de este trágico suceso, lo relevante es el cambio de actitud: lo pequeño invisible, una vez desvelado, puede ser interesante e, incluso, apasionante.

Claramente, a lo largo del siglo XIX, se consolida una apreciación muy positiva sobre la visualización de objetos pequeños que propician microscopios cada vez más sofisticados y precisos. Los descubrimientos de *Pasteur* sobre la no generación espontánea de los microorganismos y el descubrimiento de los mismos como agentes patógenos por un lado y/o como agentes beneficiosos que propician procesos de gran interés como la fermentación, por otro, fueron sin duda agentes coadyuvantes de este cambio de tendencia.

Esta asimilación cultural de lo invisible por pequeño, se hace patente en multitud de obras literarias y algunas pictóricas. Por ejemplo, un protagonista lateral, aunque esencial de la trama de dos novelas del conocido escritor de ciencia ficción *H.G. Wells*, *A slip under the microscope* y *Ann Verónica, a history of modern love*, es el microscopio

y la observación de objetos pequeños. La primera trata un problema de ética científica y la segunda es una historia de amor y emancipación femenina. El propio Wells, en su popularísima y mítica novela de ciencia ficción *War of the worlds*, llevada a la radio y al cine numerosas veces, asigna a las modestas, microscópicas e invisibles bacterias la aniquilación de la especie marciana invasora y la restauración del orden humano anterior.

La fascinación por los microorganismos y la posibilidad de hacerlos visibles impactó también en otras manifestaciones culturales como en la pintura. No me resisto a mencionar el efecto de esta fascinación sobre el cambio de estilo pictórico del pintor *Vasily Kandinskii* en la primera mitad del siglo XX. Durante su estancia en Berlín y su participación en el movimiento BAUHAUS, *Kandinskii* quedó impresionado por las formas de las células, bacterias, etc. que se podían observar en el microscopio. Esa fascinación estuvo en el origen de la evolución posterior de su pintura desde un estilo basado en formas geométricas bien definidas a otras biomórficas, de formas redondeadas con claras connotaciones y relaciones con el mundo submicroscópico de los seres unicelulares.

### **MÁS ALLÁ DEL MICROSCOPIO ÓPTICO: TRAS EL RASTRO DE LOS ÁTOMOS**

La visualización de los átomos, hoy sabemos que elemento básico constitutivo de la materia, ilustra con claridad este anhelo constante de la ciencia de visualizar las formas de organización de la materia a escalas todavía más pequeñas. Sin embargo, el fracaso de visualizar los átomos con los microscopios ópticos, incluso con los de mayor magnificación, pone también de manifiesto una realidad que se hace patente en la mayor parte de los ámbitos científicos: las limitaciones de nuestros órganos de los sentidos para percibir la realidad y la necesidad de trascender su uso mediante la aplicación de métodos de observación basados en otros principios físicos que los que rigen nuestra vista, oído, etc.

En el mundo griego antiguo, del cual bebe la cultura occidental, la invisibilidad y carácter continuo eran atributos comunes de la naturaleza de las cosas sensibles (sin contradecir ello lo ya dicho sobre la aceptación de un mundo invisible no accesible a los sentidos por su propia naturaleza). Por ejemplo, un concepto básico de la filosofía aristotélica como la “materia” se consideraba continua y no divisible y el otro elemento, la “forma”, se asumía invisible o, por lo menos no directamente perceptible mediante nuestros sentidos; en cualquier caso era no divisible. En ese contexto resulta curiosa la propuesta de *Demócrito*, quien en el siglo V antes de Cristo, postula que unas entidades minúsculas, los átomos, son los elementos constitutivos básicos de los objetos materiales. Según la doctrina atomística de *Leucipo* y *Demócrito*, el universo está constituido por innumerables corpúsculos o átomos de magnitudes imperceptibles y sustancialmente idénticos e *indivisibles* (“átomo” significa, en griego, inseparable). Estos átomos eran in-generados, eternos e indestructibles, se encuentran en movimiento en el vacío infinito y difieren entre sí únicamente en cuanto a sus dimensiones, su forma y su posición. Todos los átomos son cualitativamente idénticos.

La teoría atómica, que a día de hoy nos parece incontrovertible, no tuvo sin embargo un gran influjo en el desarrollo de la ciencia moderna hasta relativamente hace poco tiempo. Así, pese a los avances en Física y otras disciplinas científicas a partir del Renacimiento, la teoría atómica de la materia fue olvidada hasta finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX. En todo caso, en la primera etapa del desarrollo de las teorías atomísticas, la inferencia de la existencia de átomos fue indirecta y no fruto de la observación.

La teoría atómica de *Dalton*, enunciada como “ley de las proporciones múltiples” y desarrollada a caballo entre los siglos XVIII y el XIX, fue la primera teoría moderna con la pretensión de describir toda la materia y su comportamiento químico en términos de átomos. La primera parte de su teoría establece que toda la materia está hecha de átomos indivisibles (nótese la semejanza con *Demócrito*). La segunda parte, que todos los átomos de un elemento químico dado son idénticos en términos de masa y propiedades. Esta ley ponderal de *Dalton*, publicada en 1803 y basada en los trabajos de *Lavoisier* y de *Joseph Louis Proust*, establece que cuando reaccionan dos elementos y se combinan para dar lugar a compuestos diferentes, la proporción en que lo hacen está definida por números enteros sencillos. Esta evidencia sólo tiene sentido si los átomos existen y es su combinación en proporciones definidas la que da lugar a las distintas sustancias.

Déjenme en este punto hacer un inciso sobre *Joseph Luis Proust* y el hecho de que este científico francés, que enunció otra de las leyes ponderales cruciales en el desarrollo de la Química moderna, la “ley de las proporciones definidas”, desarrollara la mayoría de su actividad profesional en España. Primero en Vergara durante un pequeño periodo de tiempo y luego, contratado por la Corona, en la fábrica de artillería de Segovia y después en Real Laboratorio de Madrid, su actividad profesional en nuestro país cubrió en su conjunto un periodo de varias décadas.

Durante prácticamente todo el siglo XIX, los átomos, aunque se suponía su existencia, siguieron siendo “invisibles”. El microscopio óptico que podía bajar la escala de observación hasta dimensiones minúsculas, pero no tenía la capacidad de desentrañar y visualizar esta unidad esencial constitutiva de la naturaleza que era el átomo. Hoy sabemos que esa pretensión no es posible con la luz visible accesible a nuestros órganos de visión y que es necesario desarrollar y utilizar otros métodos de visualización. En otras palabras, utilizar otros instrumentos y mecanismos de detección que, trascendiendo a nuestros órganos de los sentidos, se basen en el uso de principios físicos alternativos.

Entre los siglos XIX y XX, *Laue* y *Bragg* pusieron de manifiesto que cuando se interacciona mediante un haz de rayos X monocromático con objetos sólidos ordenados como pueden ser los cristales (de sal, de yeso, de cuarzo, etc., nótese que estos procesos no tenían lugar en líquidos) se produce una interacción que, suponiendo la existencia de átomos ordenados dentro de los cristales, podía describirse mediante fenómenos de dispersión de ondas, según mecanismos de interferencia basados en la teoría ondulatoria de *Huygens*. Estos patrones de difracción, la mayoría muy ricos y complejos, no son en sí los átomos, pero sí un reflejo de los mismos en una representación dentro del espacio recíproco cuyas dimensiones básicas vienen dadas por  $1/L$  ( $L$  dimensión en el espacio real). Conviene añadir que del análisis matemático de estos patrones se puede

inferir la posición y el tipo de átomos que origina ese patrón de interferencia. Hoy día la difracción de rayos X es un elemento básico en el análisis de sólidos, tanto inorgánicos como moleculares, siendo crucial para ello disponer de fuentes de rayos X cada vez más sofisticadas y complejas basadas en la radiación sincrotrón.

Parece claro que para desvelar la invisibilidad de los átomos no basta con ampliar nuestras capacidades sensoriales, tal y como permitía el microscopio óptico con nuestra visión, sino aplicar nuevos principios y formas de interacción que trascienden a la capacidad y sentidos de nuestro cuerpo. Una consecuencia de ello es difuminar y hacer menos tangible el mundo de lo pequeño para nuestras limitadas capacidades de observación y percepción.

En esta estela de desvelar la existencia de los átomos, la ruptura que supuso la mecánica cuántica a principios del siglo pasado, siguió propiciando el desarrollo de capacidades adicionales para desentrañar la “invisibilidad” de los átomos, en el sentido abstracto en que hemos utilizado este término a partir de los desarrollos de *Laue y Bragg* y la representación en el espacio recíproco. Un experimento que es revelador en este sentido es el experimento de *Davison y Germer* de difracción de electrones por un cristal de níquel. Este experimento fue básico para afianzar a la emergente mecánica cuántica como una disciplina sólida con base experimental, desarrollando además nuevos principios de observación de los átomos. En este experimento se usan electrones para interactuar con la materia. Básicamente el procedimiento consistía en lanzar un haz de electrones monocromáticos sobre un cristal de níquel y verificar que el haz reflejado presentaba máximos de intensidad dependiendo de los ángulos de observación y la energía del haz utilizado. Este resultado llevaba implícito dos consideraciones, primero que los electrones se comportaban como ondas y segundo, que es lo que aquí nos interesa, que podían utilizarse como sonda para discriminar la ordenación de los átomos dentro de la estructura cristalina de los sólidos. De nuevo, tal y como ocurre con la difracción de rayos X, la difracción de electrones no nos refleja la posición real de los átomos, pero sí una imagen en el espacio recíproco con dimensiones  $1/L$ . A partir de las estructuras obtenidas es posible deducir la posición y características de los átomos en los sólidos analizados usando relaciones matemáticas adecuadas.

El uso de sondas diferentes como rayos X, neutrones, electrones o, incluso átomos acelerados, se ha generalizado para analizar con precisión la distribución de los átomos en los sólidos, sean estos cristalinos, como los que sirvieron para sentar la base de las técnicas de difracción, como amorfos o incluso líquidos, usando en este caso otros principios de interacción. A lo largo de todo el siglo XX su uso generalizado ha abierto nuevas ventanas para, indirectamente, visualizar la estructura atómica de los materiales y objetos que nos rodean, una capacidad que ha propiciado el desarrollo de nuevos principios y teorías sobre la organización de la materia. Sin embargo, todas estas técnicas no visualizan directamente los átomos, sino que proporcionan un reflejo matemático de su orden y localización en sólidos ordenados a escala atómica.

El “microscopio de efecto túnel”, desarrollado en la década de los 80 del siglo pasado *Binnig y Rohrer* supuso una disrupción en esa manera de aproximarse a la estructura atómica de los sólidos permitiendo deducir de forma directa, no un reflejo de los átomos

en un espacio recíproco ajeno a nuestra capacidad de percepción, sino directamente en el espacio real. La microscopía de efecto túnel permitió determinar de forma directa, no con nuestros sentidos basados en el uso de radiación electromagnética en un estrecho margen de longitudes de onda, sino utilizando otro principio físico como es el *efecto túnel*, la distribución de los átomos en la superficie de los sólidos (se recomienda, para una descripción más detallada, la visualización del documental del CSIC, *40 años viendo átomos*, <https://www.youtube.com/watch?v=pJ0MtKqTOco>).

Son famosas, y por qué no decirlo, de una fina calidad estética, las imágenes de IBM donde manipulando átomos de manera individual, *Don Eigler* junto con sus colaboradores en esta empresa imprimieron el logotipo de la misma moviendo 35 átomos de Xenon sobre una superficie metálica; o la imagen de un corral cuántico, también realizada en IBM por este científico, donde logró confinar las ondas electrónicas de una superficie de cobre, creando a su alrededor una barrera cerrada de átomos de hierro. Las capacidades de esta técnica para visualizar los átomos son inmensas tal y como se puede apreciar en las imágenes de una gran variedad de superficies accesibles en internet.

Aunque no creo que sea una tesis probada y debería por lo tanto comprobarse de forma sistemática, me resulta curioso que mientras ha habido una fructífera relación de vuelta entre la visualización de lo invisible y las obras pictóricas y literarias (también con el cine) siempre que lo observado/ relatado sea accesible a nuestros sentidos aumentados, esta transferencia no ha ocurrido de manera tan generalizada a la hora de ligar la obra de arte con la descripción atómica de la materia donde, como hemos visto, nuestros órganos de los sentidos resultan incapaces para esa función. Hay excepciones, sin duda. El conocido cuadro del pintor *Chris Robinson*, titulado “Eigler’s Eyes”, reinterpreta el corral cuántico de *Eigler* mediante la sustitución de los átomos de hierro por individuos que miran hacia el interior del corral, simbolizando el interés de la sociedad como observadora del progreso nanotecnológico. En arquitectura, el edificio conocido como el *Atomium*, construido en la exposición universal de Bruselas, es también un reflejo claro de la “estructura cúbica centrada en el cuerpo” de un gran número de metales de la tabla periódica. En sentido inverso, los desarrollos del arquitecto *Fuller* sobre estructuras complejas sirvieron de inspiración a *Curl*, *Kroto* y *Smalley* en la década de los ochenta del siglo XX a la hora de denominar las estructuras de carbono con forma de balón de fútbol que hoy denominamos “fulerenos”.

## **LA INVISIBILIDAD DE LAS GRANDES FORMAS U OBJETOS**

El carácter de “invisible” a nuestros sentidos se da también en relación con objetos de gran tamaño, pero alejados. Es conocido como *Galileo* utilizó de manera original un sistema de lentes conocido para visualizar en torno a 1610 los cuatro satélites de Júpiter, que él denominó “Planetas Medicianos” en honor de la familia *Médicis*. Esta visualización de lo hasta entonces desconocido resultó un revulsivo para poner en entredicho el modelo planetario clásico de *Ptolomeo*, con la Tierra como centro del universo,



y aceptar el modelo heliocéntrico de *Copernicano* donde la Tierra dejaba de tener este papel central.

De estas observaciones de Galileo a las posibilidades de observación de la astronomía moderna, como el telescopio *Hubble* y el recientemente lanzado al espacio y ya operativo *James Webb* hay seguramente la misma distancia conceptual que desde el primer microscopio incipiente de Van Leeuwenhoek a los modernos microscopios electrónicos. En cualquier caso, la observación de las grandes formas cosmológicas ha seguido una estela análoga, pasando de una intensificación de nuestra capacidad de percepción visual mediante telescopios ópticos, a la necesidad de usar otras formas de interacción no directamente accesible a nuestros sentidos como radiaciones electromagnéticas en otro ámbito de longitudes de onda (infrarrojo, microondas, etc.) o la detección de ondas gravitatorias. Creo no exagerar al decir que lo conseguido con ello nos ha proporcionado una visión cosmológica del mundo que genera vértigo, frente a la cual resulta patente la insignificancia de nuestro sistema planetario y de la propia especie humana, dentro de una visión del mundo totalmente alejada de todo principio o eje antropocéntrico.

### **SEGUNDA ACEPCIÓN DE “INVISIBILIDAD” (NO QUERER VER O QUE SE NOS VEA)**

La segunda acepción de la RAE de lo invisible como “no querer ver o que se nos vea” se ha manifestado de forma reiterada tanto en el plano científico como, de forma más amplia, en el social. Quisiera en esta última parte de esta presentación referirme a esta segunda acepción de la invisibilidad y a la probable incapacidad de las personas, incluidos los científicos en su labor investigadora, para asumir la realidad en todas sus consecuencias. También a las distorsiones que puede provocar en nuestra propio comportamiento el disponer de la capacidad de no ser visibles o creernos invisibles.

Son bien conocidos los problemas que tuvo *Galileo* con la Inquisición y como hubo de retractarse de su apoyo al modelo heliocéntrico de *Copérnico*. No es tan conocida la anécdota, ilustradora como pocas de esta segunda acepción de la invisibilidad que nos ocupa, según la cual durante sus investigaciones sobre las lunas de Júpiter, el Papa envió a un grupo de doctores de la Iglesia para indagar sobre el carácter de las digresiones de Galileo. Este invitó encarecidamente a los emisarios papales a que miraran por el telescopio para verificar su testimonio sobre los “Planetas Medicianos”. En lo que parece una actitud muy común, tanto en el ámbito científico como el cultural o social, los emisarios rehusaron mirar por el telescopio, considerando ese simple acto de mirar como un verdadero desacato religioso y quizás una blasfemia.

En el desarrollo científico son numerosísimos los ejemplos en los que descubrimientos de colegas no han querido o podido ser aceptados por los científicos coetáneos, bien honestamente porque los nuevos descubrimientos se salían de las convenciones aceptadas por la comunidad científica, o porque los colegas de profesión mantenían una inconfesable aversión o tenían celos de científicos verdaderamente creativos. No es este el espacio para ilustrar con ejemplos las numerosas ocasiones en que este rechazo

ha tenido lugar en los últimos doscientos años, pero sí para recomendar la lectura del libro de *Max Weber, El político y el científico*, que cien años después de su publicación después de la primera guerra mundial mantienen toda su vigencia en cuanto a la descripción sociológica de la actitud de negación de los descubrimientos y la valía de los compañeros de profesión científica.

El pintor surrealista belga *René Magritte*, usando el lenguaje pictórico, ha sabido desvelar como pocos la fina tela que separa la realidad de nuestras apreciaciones y de nuestra capacidad (o voluntad) de hacer visible lo invisible. Sus cuadros ausentes de rostro o sus referencias a la “traición de las imágenes” hacen referencia a la dificultad de identificar la realidad, la relatividad de lo visto y su dependencia del propio observador, su estado de ánimo o simplemente querencias vitales. Según palabras de *Magritte*, “Lo que tú ves no es lo que yo veo y lo que tú crees que ves no es lo que yo creo que veo” o “Todo lo visible oculta algo invisible”. Estas palabras, no sólo producen un cierto escalofrío sobre la relatividad de nuestras apreciaciones, sino que interpretadas desde un punto de vista científico reafirman lo coyuntural de los modelos y teorías científicas y la necesidad constante de verificación y prueba empírica.

Las recientes expresiones de “arte invisible” siguen esta estela de *Magritte*, exaltan la idea de invisibilidad y la de la subjetividad de la percepción, desarrollando estos conceptos hasta el extremo. Estará justificado o no, será fruto de una moda efímera o algo más sustancial, pero el hecho es que este tipo de expresiones artísticas concitan el interés y, más aún, la inversión pecuniaria de grandes sumas de dinero por estas obras “invisibles”.

No querer ser visto parece ser una aspiración bastante generalizada de nuestro intelecto, quizás anclado en la actitud infantil de taparse los ojos con la pretensión de que no ver nos hace así mismo invisibles. La capa de *Harry Potter* o el anillo de *Frodo, Bilbo o Gollum* a los que me referí al principio de esta presentación son quizás una extensión de este anhelo infantil de desaparecer y no ser visto. La ciencia moderna ha sido sensible a esta pretensión, quizás no con la motivación ingenua de los niños, y ha desarrollado y desarrolla procedimientos de invisibilidad con pretensiones seguramente menos encomiables. Los sistemas de protección de aviones y barcos de guerra para hacerlos invisibles al sonar, los metamateriales que son capaces de actuar como “sonar cloaks” o, incluso “eletromagnetic cloacks”, aproximándose bastante a hacer realidad la capa de invisibilidad de *Harry Potter*, son ejemplos de la ciencia y la tecnología moderna que rastrean los caminos de la invisibilidad con ánimo de manejarla a voluntad.

La ciencia ficción en manos de *Wells* y su *Invisible man*, novela de 1897, fue quizás una de las primeras ocasiones en las que se fantaseó sobre la posibilidad de hacer a alguien invisible. En “El hombre invisible”, el protagonista *Griffin* ha encontrado una fórmula para alterar las propiedades ópticas de los objetos, logrando que dejaran de absorber y reflejar la luz y volviéndolos así invisibles. El mismo, aplicándose esta fórmula se hace invisible. En la práctica, su cualidad de invisible le produce inadaptación y el rechazo de la propia sociedad, de la que, a la postre, decide vengarse, libre de todo código o atadura moral. Es sabido que el final dramático de la novela es la muerte del

protagonista que, en su agonía, recupera el carácter visible, mientras que el secreto de su fórmula queda protegido frente al inquisidor escrutinio de un antiguo amigo con el que se había enfrentado.

El premio nobel de literatura *Luigi Pirandello*, en su conocida novela “El Difunto Matías Pascal”, aborda otra forma de invisibilidad, la social. El protagonista tiene la posibilidad de desaparecer socialmente al ser considerado fallecido y acoge esta posibilidad con entusiasmo, asumiendo que quedaría libre de todo tipo de vínculos y obligaciones, incluso familiares y que podría así empezar una nueva vida. Tras repetirse dos veces ese proceso de muerte civil, el final no puede ser más decepcionante para el difunto Matías Pascal, quien vuelto a sus orígenes encuentra una vida de aislamiento y negación sin capacidad de reconocimiento social.

En nuestro ámbito cultural *Antonio Buero Vallejo* trató el tema de la invisibilidad, desde la perspectiva de la ceguera en “La ardiente oscuridad”. En ella se relata la vida de unos jóvenes invidentes que viven en un colegio adaptado para ellos. Ese entorno de confort, a modo de burbuja placentera, se ve distorsionado por un invidente que se rebela contra su condición de tal. El resultado vuelve a ser trágico y refleja nuestra aparente incapacidad de aceptar, de percibir, diríamos que de superar la invisibilidad del mundo más allá de nuestro entorno.

Para terminar, no me resisto en mencionar aquí la metáfora de la reciente película accesible en Netflix del director *Adam Mackay* “No mires arriba”. Este film trata la invisibilidad desde la perspectiva de negarse a ver. El suceso que cuenta se desarrolla con el trasfondo de negarse a mirar y afrontar de cara los hechos y recuerda a la negativa de los enviados papales a mirar las lunas de Júpiter. Ante la evidencia científica de que un meteorito colisionaría irremisiblemente sobre la Tierra, la actitud de la sociedad, tal y como lo cuenta *Mackay*, es negar la evidencia o, simplemente, no sentirse afectada por esa posibilidad, aunque finalmente la fatalidad de la colisión ocurra de manera insoslayable aniquilando toda la vida sobre la Tierra.

Concluyo con dos reflexiones generales. Una primera que la Ciencia y otras expresiones de la cultura humana no están tan separadas como en un principio podría parecer. Hoy más que nunca debe afirmarse que la división tradicional entre Ciencias y Letras, tal y como nos enseñaban en el bachillerato, es arbitraria y constituye una taxonomía fruto de la comodidad y los prejuicios. Una segunda que desvelar la invisibilidad de las cosas o preservar su carácter oculto han sido y siguen siendo tendencias y propósitos de la mente y la sociedad humana, que se han manifestado constantemente a lo largo de la historia. Quizás se deba ello a que desvelar la invisibilidad de la naturaleza como pretende la Ciencia, o modificar nuestras percepciones del mundo y las relaciones sociales o las apreciaciones basadas en nuestros prejuicios, como pretenden el arte, la literatura o la filosofía, exige aplicar mecanismos intelectuales y canalizar vínculos y relaciones sociales que rompan prejuicios y no se acomoden a la costumbre. De alguna manera preferimos mantener la invisibilidad de las cosas, con tal de que nuestras convicciones y principios, incluidos muchas veces los científicos y, sobre todo, nuestro modo de vivir, no se vean afectados.



## **POWER TO THE PEOPLE**

*Conferencia pronunciada por  
el Ilmo. Sr. D. Antonio Gómez Expósito,  
dentro del ciclo “Los martes de la Academia”,  
el día 18 de octubre de 2022.*

### **RESUMEN**

La civilización actual, sustentada sobre la combustión de combustibles fósiles, se encuentra ante la encrucijada de tener que cambiar rápidamente su modelo de abastecimiento energético. Ello pasa necesariamente por la utilización masiva de energías renovables, todas ellas dependientes, directa o indirectamente, de la radiación solar. Esta conferencia aborda el caso particular de la energía fotovoltaica, que ya en esta década se convertirá en la principal aportación al *mix* energético mundial. Frente al sistema fuertemente centralizado del siglo XX, la energía fotovoltaica está permitiendo a los consumidores, por primera vez en la historia, producir *in situ* su propia electricidad, lo cual cambiará drásticamente las reglas de juego. Además, la nueva regulación promovida por las recientes directivas de la Unión Europea favorece que los auto productores puedan compartir con sus vecinos la electricidad que no puedan consumir, dando lugar a lo que se conoce como comunidades energéticas locales, en plena eclosión en estos momentos tanto en países ricos como en vías de desarrollo.

### **1. EL INEFICIENTE Y CONTAMINANTE PARADIGMA ENERGÉTICO DEL SIGLO XX**

Desde la introducción de la máquina de vapor en el siglo XVIII, pero sobre todo desde finales del siglo XIX, con el desarrollo de la electricidad y el motor de combustión interna, el ser humano no ha dejado de aumentar exponencialmente su consumo energético. Actualmente, alrededor del 85% de la energía primaria mundial procede de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas). Entre otros efectos medioambientales negativos, relacionados, principal pero no exclusivamente, con la calidad del aire en las grandes ciudades, este modelo energético ha hecho que las emisiones globales de CO<sub>2</sub> a la atmósfera hayan pasado de unos 200 millones de toneladas/año en 1850 a más de 36.000 millones de toneladas/año en la actualidad, lo que supone el 75% de las emisiones totales de efecto invernadero.

Además, el sistema energético actual es enormemente ineficiente. De toda la energía primaria consumida, poco más del 60% acaba llegando al consumidor final como energía utilizable. El resto se pierde durante los procesos de extracción, transformación, transporte, etc., lo que pone claramente de manifiesto la ineficiencia del sistema vigente. Por ejemplo, la generación eléctrica a partir de carbón o gas tiene una eficiencia promedio de poco más del 30%, si bien para los modernos ciclos combinados de gas esta cifra se sitúa en torno al 50%, y sólo en las relativamente pequeñas centrales de cogeneración, donde se aprovecha simultáneamente la electricidad y el vapor para procesos industriales, el rendimiento llega al 80%. A ello hay que sumar que buena parte de la energía final también se desperdicia, cuando se utiliza en sistemas de conversión de energía térmica en mecánica, por su propia naturaleza poco eficientes. Por ejemplo, la eficiencia tanque-rueda de los vehículos ligeros actuales, que utilizan motores de combustión, varía entre el 15% para los más antiguos y el 30% para los modernos diseños híbridos [Smil, 2017].

Por otro lado, no todos los habitantes del planeta tienen las mismas oportunidades de acceso a los combustibles fósiles. Según datos de la ONU, casi mil millones de personas carecen de acceso a la electricidad, mientras que más de 2.500 millones tampoco disponen de un sistema salubre para conservar y cocinar sus alimentos. Por ejemplo, cada ciudadano de Estados Unidos o Qatar consume en promedio una 35 veces más energía que uno de Bangladesh, lo cual es una muestra de lo injusto que resulta el sistema energético actual.

Finalmente, conviene recordar que los combustibles fósiles son finitos y cada vez más costosos de extraer. Ello implica que el retorno energético de las instalaciones de extracción de cualquier combustible fósil (sea carbón, petróleo o gas) va menguando con el tiempo, lo cual se traduce en un incremento continuo de la cantidad de energía invertida por cada unidad de energía suministrada. Actualmente, la extracción y producción de combustibles fósiles líquidos (derivados del petróleo) requiere alrededor del 15% de la energía contenida en los mismos, y al ritmo actual de extracción dicha cifra podría acercarse al 50% en 2050 [Delannoy, 2021].

Por los motivos enunciados en los párrafos anteriores, el ser humano ha constatado en las tres últimas décadas que el modelo económico-energético actual, basado en la combustión de fósiles, no es sostenible en el largo plazo, y busca alternativas al *statu quo* que le permitan seguir creciendo de manera compatible con la biosfera.

## **2. LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA: ENERGÍAS RENOVABLES AL RESCATE**

En este apartado se hará un breve repaso al origen y situación actual de los diferentes sistemas de generación renovable, que constituyen la base de la transición energética en la que estamos embarcados actualmente.

Desde que supo dominar el fuego, hace más de 500.000 años, el ser humano no ha dejado de usar la biomasa como fuente de energía. Todavía en la actualidad, la biomasa es uno de los principales recursos energéticos en muchos países subdesarrollados. Sin

embargo, globalmente, la biomasa sólo representa escasamente el 10% de la energía primaria utilizada, y no es previsible que este porcentaje crezca significativamente en el futuro, si se pretende hacerlo de forma sostenible. Todo ello a pesar de los cantos de sirena de los principales actores del sector petrolero y gasístico, que ven en los biocombustibles una tabla de salvación como sustitutos de los combustibles fósiles para continuar con el “*business as usual*”.

Por lo que respecta a la energía hidráulica, aprovechada en los molinos de agua al menos desde la época romana, su situación actual como fuente de energía eléctrica difiere mucho entre regiones. Así, mientras que algunos países (Noruega, Congo, Paraguay, etc.) producen prácticamente toda su electricidad con energía hidráulica, este recurso es casi inexistente en otras regiones (Emiratos Árabes, Argelia, etc.). Mundialmente, poco más del 15% de la electricidad se produce en saltos de agua, destacando la presa de las Tres Gargantas en China (la de mayor potencia instalada, con 22,5 GW), y la de Itaipú en Brasil-Paraguay (la que genera mayor energía anual, unos 100 TWh).

Desgraciadamente, según las previsiones de la AIE y otros organismos, ni la biomasa ni la hidráulica tienen un potencial de crecimiento notable, con capacidad para encarar las grandes necesidades que un futuro sistema descarbonizado demandará. Tampoco se espera que la energía de los océanos (undimotriz, mareas y corrientes) aporte una fracción significativa del *mix* eléctrico futuro. Consecuentemente, salvo aquellos países que no descarten la opción de la energía nuclear, el resto no tendrá más remedio que apoyarse principalmente en las energías eólica y solar para lograr la mencionada transición energética.

Amén de su utilización para propulsar barcos de vela, presentes en casi todas las civilizaciones antiguas (desde los egipcios y fenicios, en el Mediterráneo, hasta los chinos), la energía del viento se ha utilizado en rudimentarios molinos desde hace más de mil años. Véanse por ejemplo los molinos de cereal de eje vertical, en Nashtifan (Irán), que se remontan al siglo XI, o los molinos de extracción de agua en Lassithi (Creta), del siglo XV, por no hablar de los populares molinos de La Mancha u Holanda. Prácticamente desde la invención de la electricidad, a finales del siglo XIX, los molinos de viento se han utilizado en zonas rurales para alimentar pequeños consumos eléctricos. Pero no es hasta bien entrados los años 80 del siglo pasado, tras las crisis petroleras de los 70, cuando se empieza a considerar seriamente la utilización de la energía eólica para producir electricidad masivamente, en parques eólicos compuestos de modernas máquinas de gran tamaño, ubicados tanto en tierra como en aguas poco profundas.

Durante la primera década del siglo XXI, la energía eólica se benefició de numerosas mejoras tecnológicas, tanto en materiales como en electrónica de potencia y máquinas eléctricas rotativas (desde las primeras turbinas con generadores de inducción, hasta las actuales de imanes permanentes), así como de la consecuente reducción de costes. En la actualidad, se están instalando rutinariamente en tierra turbinas de 4-5 MW de potencia, frente a las máquinas de 2-3 MW de hace unos años, mientras que en eólica *off-shore* se han desarrollado turbinas de hasta 15 MW, cuyas palas barren una superficie de unos 200 m de diámetro. La potencia eólica mundial acumulada ha alcanzado en 2022 los 900 GW, más del triple que hace una década, y su contribución a la producción eléctrica

global supone ya más del 6%. El líder de este tipo de energía en términos relativos es Dinamarca, donde casi el 60% de la electricidad proviene del viento.

En el ámbito de la energía solar se distinguen básicamente dos tipos de tecnologías, la fotovoltaica (FV) y la termosolar. Esta última puede producirse de forma distribuida, mediante captadores ubicados en las cubiertas de edificios, que suministran agua caliente de baja temperatura, o bien de forma concentrada, en grandes plantas donde se produce vapor a alta temperatura para mover turbinas de tamaño medio (entre 10 y 50 MW). Dichas plantas pueden utilizar espejos planos, que concentran la radiación solar en un punto elevado, o bien sistemas lineales cilindro-parabólicos, que concentran la radiación en una tubería ubicada en el foco de la parábola, por donde circula un fluido portador de calor. Una de las principales ventajas de este tipo de plantas es la posibilidad de almacenar energía térmica en grandes tanques de sales fundidas, para ser utilizada durante las primeras horas de la noche. Actualmente, la potencia global acumulada de plantas termosolares ronda los 7 GW, es decir, unas 130 veces menos que la eólica, habiendo sufrido un notable estancamiento en los últimos años, por su mayor coste y complejidad respecto a la energía FV.

Si bien la energía FV comenzó a utilizarse en los años 60, primero en aplicaciones aeroespaciales y luego en instalaciones remotas (boyas marítimas, repetidores de TV, etc.), no fue hasta 1982 cuando Arco Solar construyó en California la primera instalación FV conectada a la red (1 MW de potencia). Sin embargo, el verdadero impulso a la energía FV se produjo en 1989, cuando Alemania puso en marcha el programa conocido como "1.000 tejados", seguido en 1999 por el más ambicioso "100.000 tejados", ambos dotados con generosas primas a la producción FV distribuida. Varios años más tarde (2007-2008), tanto Alemania como España destacaron en el panorama internacional por el importante apoyo económico al despliegue masivo de plantas FV, aunque con notables diferencias entre ambos modelos, a favor del *Energiewende* alemán.

Con aproximadamente una década de retraso, la energía FV ha seguido una senda de crecimiento exponencial muy similar a la que antes vivió la eólica, con tasas de crecimiento anual que actualmente superan el 20%. La potencia global acumulada de plantas FV superó a la eólica en 2020, y superará también la potencia hidráulica instalada en 2023. Aunque la energía solar supone en la actualidad escasamente el 4% del total de electricidad producida a nivel mundial, si no surgen obstáculos regulatorios o de otro tipo (escasez de materias primas), teniendo en cuenta las tasas de crecimiento actuales, la producción FV se duplicará aproximadamente cada cinco años.

En 2022 se destinaron globalmente unos 300.000 millones de euros al desarrollo de la energía solar (un 36% más que en 2021), mientras que la eólica está estancada alrededor de los 160.000 millones [Bloomberg, 2023]. En conjunto, casi el 90% de la nueva generación instalada en 2022 fue renovable, lo cual habría sido impensable hace solo un lustro.

Una característica distintiva de las energías renovables, frente al sistema anterior basado en combustibles fósiles, es su naturaleza distribuida o difusa, que encaja perfectamente con el carácter modular de las tecnologías desarrolladas para aprovechar estos recursos, sobre todo la FV. Esta peculiaridad, que hace dos décadas se consideraba el



peor inconveniente de las renovables, supuestamente porque impedía aprovechar lo que los economistas llaman "economías de escala", ha mostrado a la postre ser una de sus principales ventajas. La razón de esa aparente contradicción radica en que, mientras que la economía de escala en los sistemas fósiles centralizados surge principalmente del incremento de eficiencia conforme crece el tamaño de la planta (o sea, una planta de gas de 1000 MW es más barata y eficiente que 10 plantas de 100 MW), en el caso de las renovables la reducción de costes se produce por la producción e instalación masiva de sistemas modulares idénticos (paneles FV o turbinas eólicas), de forma que, cuantos más paneles FV se fabrican e instalan, más baratos resultan. Ello explica que, en solo una década, los costes de la FV se hayan reducido casi un 95%. Este fenómeno no se da en centrales nucleares, puesto que cada proyecto de central nuclear es singular y específico para su lugar de ubicación.

Existe unanimidad entre los expertos respecto al prometedor futuro de las energías renovables, que sin duda alguna se convertirán en el principal componente del *mix* eléctrico (ya lo son en muchos países, incluida España, donde el 48% del consumo en la península fue renovable en 2021), en un futuro en el que la electricidad deberá tener un peso mucho mayor que en la actualidad si de verdad queremos conseguir emisiones nulas a lo largo del siglo XXI [Irena, 2019]. Para acelerar esta transición hacia un mundo basado principalmente en energía solar y eólica, deben conjugarse sucesivas mejoras tecnológicas en aspectos aún sin resolver satisfactoriamente, como el almacenamiento de energía renovable, con una adecuada regulación que atraiga y facilite inversiones masivas hacia el sector energético.

### **3. LA AUTOPRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD: “PROSUMIDORES”**

Paradójicamente, la principal barrera para un despliegue rápido y generalizado de las energías renovables ya no son los costes, que como se indicó anteriormente se han reducido drásticamente en los últimos años, sino la existencia misma del actual sistema centralizado basado en combustibles fósiles. En efecto, las masivas inversiones en toda la cadena de producción de los combustibles fósiles de las últimas décadas (exploración de nuevos yacimientos, refinado, almacenamiento y distribución) aún no están amortizadas, por lo que corren el riesgo de convertirse en activos “hundidos” si la transición energética ocurriese demasiado rápido. Ello explica en gran medida la fuerte oposición al desmantelamiento del sistema actual por parte de las multinacionales de los sectores tradicionales (carbón, petróleo y gas), que necesitan más tiempo del que disponemos para lograr un “aterrizaje” suave hacia el nuevo modelo energético.

Afortunadamente, las energías renovables (especialmente la FV) no sólo están descarbonizando el consumo energético, sino que están desafiando el paradigma fuertemente centralizado actual, gracias al despliegue de pequeñas y medianas instalaciones que se instalan muy cerca del propio consumo. En efecto, el carácter modular de la energía FV la hace idónea para instalaciones de cualquier tamaño, desde plantas más potentes que una central nuclear (que superan en algunos casos los 1.500 MW, a base de conectar unos tres millones de paneles) hasta pequeñas instalaciones desde un kilovatio.

Lo mismo ocurre con el almacenamiento en baterías, que en los últimos años han mejorado notablemente sus prestaciones, a la par que su precio se ha reducido cerca del 90% en una década, gracias a los desarrollos relacionados con el vehículo eléctrico. En la actualidad ya existe casi un centenar de grandes sistemas basados en baterías de litio o de flujo, de entre 100 y 500 MW de potencia, muchos de ellos con hasta cuatro horas de almacenamiento. Pero también se comercializan sistemas de almacenamiento domésticos, desde 5 kWh, que resultan idóneos como complemento de las plantas FV sobre tejado.

Se abre así la posibilidad de que cualquier consumidor, sea residencial, industrial o de servicios, produzca una parte significativa de su propio consumo eléctrico, en lugar de comprarlo a terceros, siempre que disponga de superficie suficiente para la instalación FV (generalmente sobre su propio tejado o cubierta). Coloquialmente, se ha dado en llamar “*prosumidores*” (contracción de las palabras “*pro*-ductor” y “*con*-sumidor”) a este tipo de usuarios, que pueden consumir electricidad de la red o verterla a la misma cuando tienen excedentes. Las instalaciones FV sobre cubierta permiten superar el 80% del consumo propio si se combinan con baterías, cifra que se reduce al 40-50% en ausencia de estas.

Lógicamente, las grandes plantas sobre suelo tienen menor coste que las instalaciones distribuidas sobre tejado<sup>1</sup>, pero adolecen de otros inconvenientes, como la necesidad de encontrar una ubicación adecuada, que supere la preceptiva declaración de impacto ambiental y que esté lo más cerca posible de un punto de evacuación eléctrica, lo cual resulta cada vez más complicado<sup>2</sup>. Hay países, como Alemania o Australia, donde la FV distribuida sobre cubiertas representa hasta el 80% del total instalado, mientras que en otros ocurre justo lo contrario. Concretamente, en Australia más del 30% de cubiertas residenciales (más de tres millones de tejados) están equipadas con FV para autoconsumo, superando el 40% en provincias como Australia del Sur o Queensland.

El reto está en encontrar el adecuado equilibrio entre un modelo centralizado para las energías renovables, que pretende replicar el viejo modelo de instalaciones térmicas del siglo XX, o un modelo esencialmente distribuido, cuyas principales ventajas se derivan de su proximidad al consumo (mayor resiliencia, menor necesidad de despliegue de redes, mejor aprovechamiento de la superficie, etc.).

La Agencia Internacional de la Energía [IEA, 2019] estimaba que la potencia FV sobre tejado instalada a finales de 2024 sería el 40% de un total de 700 GW FV, comparable a toda la eólica *on-shore*. Pero teniendo en cuenta que a mediados de 2022 ya se superaron holgadamente los 1.000 GW de FV (400 GW sólo en China), podemos concluir sin temor a equivocarnos que las previsiones de la burocrática agencia de la OCDE

---

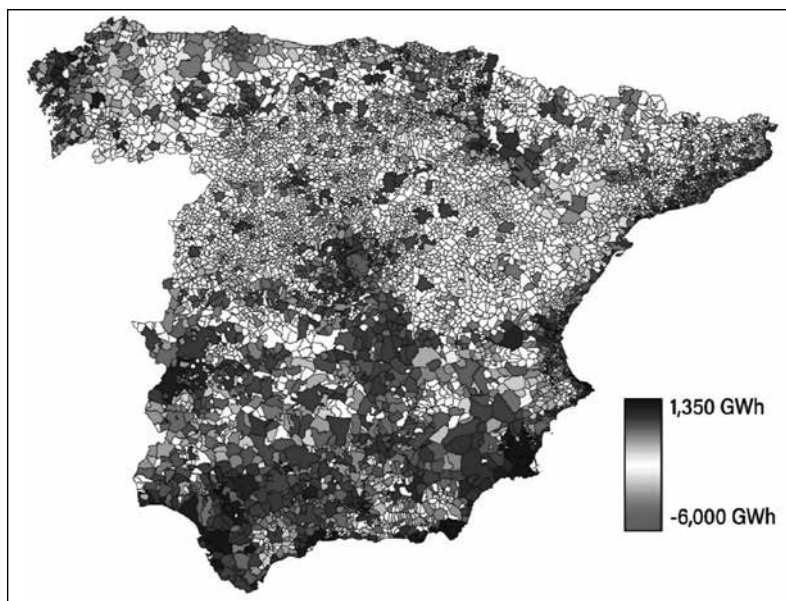
1. La diferencia de costes se está reduciendo, conforme proliferan las instalaciones sobre tejado a la vez que las instalaciones sobre suelo tienen que asumir sobrecostes cada vez mayores para compensar a la población de los territorios donde se instalan. Por ejemplo, una planta de 500 kW sobre la cubierta de una nave industrial puede ser competitiva en costes con una planta de 50 MW sobre suelo.

2. La oposición social a la instalación de grandes parques FV en terrenos agrícolas o de interés paisajístico es cada vez mayor, como refleja incluso la reciente filmografía, y esta tendencia irá en aumento.

se quedan muy cortas, como suele sucederle históricamente en temas de renovables. Si el ritmo de crecimiento actual se mantiene, la potencia FV instalada globalmente a finales de 2025 debería estar en torno a los 1500-1600 GW, de los que alrededor del 30% serán sobre cubierta.

En España, la potencia FV sobre cubierta ha pasado de unos testimoniales 120 MW a finales de 2017 a los más de 5 GW acumulados a finales de 2022 (es decir, se ha multiplicado por 40 en los últimos cinco años). Sólo en 2022, la potencia FV instalada sobre cubiertas se ha duplicado en nuestro país (lo que supone una tasa de crecimiento histórica, superior al 100%). A pesar de dicho crecimiento, los 5 GW sobre tejado suponen sólo el 25% de los 20 GW sobre suelo, muy lejos aún de países como Australia, Holanda o Alemania, pero el potencial FV de los tejados en la península ibérica está aún muy lejos de agotarse. Según un estudio del IDAE, el potencial teórico supera los 170 GW, aunque trabajos más recientes<sup>3</sup> estiman un potencial que excede los 200 GW. Por tanto, frente a las previsiones iniciales del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima, que asignaba a la FV una cuota de 39 GW en 2030, las tendencias actuales sugieren que dicha cifra podría doblarse, hasta superar los 75 GW, de los que un 30-40% podría ser sobre cubierta.

**MAPA PENINSULAR QUE MUESTRA EL DESCUADRE ANUAL ENTRE EL POTENCIAL DE GENERACIÓN FV SOBRE TEJADO DE CADA MUNICIPIO Y EL CONSUMO ELÉCTRICO ACTUAL DEL MISMO (EN ROJO LOS MUNICIPIOS DEFICITARIOS Y EN AZUL LOS EXCEDENTARIOS)**



3. S. Joshi et. al., “High resolution global spatiotemporal assessment of rooftop solar photovoltaics potential for renewable electricity generation”, Nat Commun 12, 5738 (2021).

Otro estudio reciente ha analizado, a nivel municipal, el potencial de las zonas urbanas de la España peninsular para instalar FV sobre tejado [Gómez-Expósito, 2020]. La conclusión es que, utilizando solo el 45% de la superficie de las cubiertas de edificios, se dispondrían de unos 1.100 km<sup>2</sup>, suficientes para instalar alrededor de 230 GW de FV sobre tejado, que podrían producir teóricamente un 35% más de electricidad que el consumo nacional actual. La figura anterior muestra, a nivel municipal, el exceso (azul) o déficit (rojo) de energía anual, en un hipotético escenario en el que toda la electricidad proviniese de FV sobre tejado. Puede apreciarse que, salvo en las grandes ciudades, donde el consumo industrial es elevado, y la cornisa cantábrica, donde el recurso solar es menor, el resto de los municipios (más del 95%) serían teóricamente autosuficientes, desde el punto de vista eléctrico, solo con la producción FV sobre tejado. Todo ello suponiendo que existirá una cantidad de almacenamiento suficiente para atender el consumo hora a hora, lo cual dependerá a su vez de la presencia de generación gestionable (como la hidráulica y la biomasa), de la capacidad de las interconexiones con Europa y de la flexibilidad de la demanda.

#### **4. MODELOS DE GESTIÓN DEL AUTOCONSUMO**

Hasta la entrada en vigor del RD 244/2019, el autoconsumo FV en España era testimonial (unas 1.000 instalaciones frente a más de un millón en Alemania). La razón principal era que este tipo de instalaciones no solo no estaban incentivadas, sino que la normativa anterior, concebida para reducir el galopante déficit tarifario acumulado desde 2009, penalizaba el autoconsumo, al imponerle peajes de respaldo y cargos a la electricidad autoproducida, incluso aunque no circulase por las redes de distribución (RD 900/2015).

En el mencionado real-decreto de abril de 2019, además de simplificar los trámites burocráticos y técnicos, se eliminó la inscripción obligatoria en el registro de productores de energía para instalaciones de potencia inferior a 100 kW y, lo más importante, se reconoció por primera vez el derecho al autoconsumo compartido, de especial importancia en un país como España, donde dos tercios de la población vive en bloques de pisos. Inicialmente, el autoconsumo compartido estuvo limitado a un círculo de 500 metros de radio desde la instalación FV sobre tejado, pero en octubre de 2022 (RD-ley 18/2022) dicha distancia se amplió a 1 km, que posteriormente volvió a ampliarse hasta los 2 km (RD-ley 20/2022). La potencia máxima de la instalación también se aumentó desde los 100 kW iniciales hasta 500 kW.

Amén de las mencionadas simplificaciones administrativas, las instalaciones sobre tejado han estado incentivadas desde entonces con diferentes programas de subvenciones, gestionados por las comunidades autónomas y por muchos ayuntamientos (reducción del IBI, etc.). A ello hay que añadir que los excedentes del autoconsumo, es decir, la electricidad que el propietario no puede consumir y se vierte a la red, son remunerados de acuerdo con la evolución de los precios del mercado mayorista. En el mercado regulado, el montante de dichos excedentes no puede superar el coste del término de

energía de cada factura mensual (lo que se denomina “compensación simplificada de excedentes”). Sin embargo, desde 2022, cada vez más comercializadoras del mercado libre ofrecen lo que se denomina “batería virtual”, un producto comercial que permite acumular el valor económico de todos los excedentes vertidos en el pasado para utilizarlo en meses donde la producción FV es menor que el consumo, lo que aumenta notablemente los ahorros en la factura de electricidad. Combinando adecuadamente el almacenamiento diario de una batería física, con el ahorro económico mensual y estacional de la “batería virtual”, muchos *prosumidores* con una instalación FV correctamente dimensionada están logrando lo que parecía una quimera hace sólo unos años: que sus facturas de la luz sean a coste cero prácticamente todos los meses del año.

Gracias a todos estos factores (reducción de costes de la instalación, subvenciones directas o indirectas, compensación por excedentes, etc.), los plazos de amortización de una instalación FV sobre tejado se han reducido desde los 8-10 años hasta los 3-4 años, lo cual explica sin duda la explosión de este tipo de instalaciones, que como se indicó anteriormente han crecido más del 100% en 2022.

Pero la regulación del autoconsumo compartido todavía es mejorable en algunos aspectos. Por ejemplo, en la actualidad, los coeficientes de reparto de la producción FV compartida son estáticos, es decir fijados de antemano de mutuo acuerdo entre los interesados. Ello quiere decir que, si un participante se ausenta por vacaciones u otro motivo, su parte del consumo se pierde, aunque el resto de los usuarios estuviesen dispuestos a utilizar dicho excedente. Esta limitación no obedece realmente a razones técnicas, puesto que los actuales contadores digitales permitirían fácilmente implantar coeficientes de reparto que se fuesen adaptando dinámicamente al consumo horario de los participantes en la instalación de autoconsumo compartido, de modo que los vertidos se minimizasen en todo momento.

Un paso más allá del autoconsumo compartido lo constituyen las llamadas Comunidades Energéticas Locales (CEL), reguladas por la CE mediante sendas directivas 2018/2001 (comunidad de energía renovable) y 2019/944 (comunidad ciudadana de energía), todavía incompletamente traspuestas a la regulación española. A diferencia del simple autoconsumo compartido, que no tiene entidad jurídica propia más allá del contrato firmado con una comercializadora, las CEL son entidades promovidas por personas físicas, pymes o municipios, generalmente constituidas como cooperativas, cuyos requisitos básicos son: 1) participación abierta y voluntaria; 2) deben estar controladas por los socios locales; y 3) su objetivo social es exclusivamente ofrecer beneficios energéticos a los participantes, no rentabilidad económica.

Las CEL están pensadas para facilitar el autoconsumo local de aquellos ciudadanos que no disponen de una cubierta propia, o no pueden hacer el desembolso de una instalación completa, pero aun así quieren beneficiarse de la ubicua energía solar. Son por tanto instrumentos de gran interés para las clases más desfavorecidas de la sociedad, frente al autoconsumo individual actualmente predominante, más común en viviendas unifamiliares. Mientras que en Alemania existen unas 2.000 comunidades energéticas, en España apenas estamos empezando. Gracias al programa IMPLEMENTA<sup>4</sup> de incen-

4. [https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/ayudas\\_y\\_](https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/ayudas_y_)

tivos a proyectos piloto singulares del IDAE, se han registrado alrededor de un centenar de iniciativas, la mayoría de ámbito municipal, pero en los próximos años se espera una eclosión de este fenómeno asociativo, que sin duda contribuirá a empoderar a los ciudadanos y hacerlos copartícipes de su abastecimiento energético.

Más allá del ámbito cooperativista local o municipal, la CE también está promoviendo el desarrollo de los llamados “agregadores” de energía. A diferencia de las comercializadoras convencionales de electricidad, que sólo compran y venden energía en los mercados habilitados para tal fin (corto y largo plazo), para satisfacer los consumos horarios de sus clientes, los agregadores son empresas con una infraestructura digital muy sofisticada, que les permite gestionar en tiempo real todos los activos distribuidos (producción FV, almacenamiento, demanda flexible, etc.) de miles de consumidores, para que actúen de forma coordinada de cara al sistema eléctrico, como si fuesen una planta de generación virtual (por ello se les conoce también como plantas de potencia virtuales, o VPP por sus siglas en inglés).

Por ejemplo, la empresa *Next Kraftwerke*<sup>5</sup>, que empezó a operar en Alemania en 2010, gestiona en la actualidad los activos de más de 15.000 clientes de todo tipo (residenciales, comerciales e industriales) repartidos por siete países europeos, con un total de más de 12 GW de potencia (comparable a 12 grupos nucleares), y una energía anual de 15 TWh (del orden de la producción hidráulica de un país como España). Sus sistemas de control le permiten participar no solo en los mercados de energía, sino también, como cualquier generador convencional, en los mercados de ajuste y desvíos, que cada vez irán adquiriendo mayor importancia conforme la penetración renovable aumente su cuota.

## CONCLUSIONES

El objetivo de descarbonizar la economía pasa necesariamente por electrificar lo más posible el consumo energético, así como lograr que prácticamente toda la producción de electricidad sea renovable. Si actualmente sólo el 20% de energía final consumida (24% en España) se hace en forma de electricidad, el objetivo hacia 2050 sería incrementar dicho porcentaje hasta niveles del 80% o superiores, lo cual plantea notables desafíos técnicos y económicos porque obligará a cambiar radicalmente casi todos los procesos productivos, así como los medios de transporte, empezando por el vehículo privado.

La naturaleza distribuida de las energías renovables, sobre todo la solar, junto a la tecnología modular de fabricación de paneles FV y baterías, están poniendo en entredicho la validez del paradigma fuertemente centralizado del sistema eléctrico del siglo XX, donde la electricidad se producía en grandes centrales eléctricas y se transportaba a largas distancias mediante líneas de alta tensión.

Nos encaminamos, por tanto, hacia un futuro en el que, al menos en países con una latitud adecuada, muchos ciudadanos y empresas tendrán la oportunidad de producir,

---

5. <https://www.next-kraftwerke.es/>

bien con sus propios medios o aprovechando los excedentes de sus vecinos, hasta un 80% de la electricidad que consumen. Bien mirado, esto no es más que hacer con la energía lo que la humanidad ha hecho durante milenios con otros bienes y servicios (por ejemplo, la producción de huertos familiares, la cría de cerdos o gallinas, etc.), antes de la intensa industrialización y urbanización que caracteriza a la civilización actual.

En 1971, John Lennon publicó un álbum titulado “*Power to the People*”, que formó parte de los movimientos sociales de los 60, los cuales culminaron con la revolución de mayo del 68 en Francia. El autor de estas líneas está convencido de que la década actual será conocida en el futuro como la década de la revolución energética, sin posible vuelta atrás, donde las personas (*people*) dispondrán de su propia potencia eléctrica (*power*), sin perder de vista también la importante carga de poder político que ello conlleva.

La frase “Mucha gente pequeña en lugares pequeños, haciendo cosas pequeñas, pueden cambiar el mundo”, se atribuye al escritor uruguayo Eduardo Galeano, pero también a Saint Jean-Baptiste de La Salle (siglo XVIII). Las modestas plantas FV sobre tejado mostrarán, en menos de dos décadas, la verdad que esconde dicha frase.

## REFERENCIAS

- L. DELANNOY (2021), ET. AL, Peak oil and the low-carbon energy transition: A net-energy perspective, *Applied Energy* 304 (2021), 117843.
- A. GÓMEZ-EXPÓSITO, A. ARCOS-VARGAS, F. GUTIÉRREZ (2020), On the potential contribution of rooftop PV to a sustainable electricity mix: The case of Spain, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 132, 110074.
- F. GUTIÉRREZ, A. ARCOS-VARGAS, A. GÓMEZ-EXPÓSITO (2022), Robustness of electricity systems with nearly 100% share of renewables: A worst-case study, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 155, 111932.
- IEA (2019), International Energy Agency, Market Report Series: Renewables 2019. Versión en línea: <https://webstore.iea.org/renewables-2019>
- IRENA (2019), Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. Versión en línea: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA\\_Future\\_of\\_Solar\\_PV\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf)
- V. SMIL (2017), *Energy and civilization: a history*, Cambridge (MA), USA, The MIT Press.
- BLOOMBERG (2023), <https://about.bnef.com/blog/a-record-495-billion-invested-in-renewable-energy-in-2022/>





# ***CAMBIO CLIMÁTICO Y AMBIENTAL EN LA CUENTA DEL MAR MEDITERRÁNEO***

*Conferencia pronunciada por  
la Ilma. Sra. D.<sup>a</sup> Montserrat Vilà Planella,  
dentro del ciclo “Los martes de la Academia”,  
el día 15 de noviembre de 2022.*

## ***RESUMEN***

El cambio climático está en boca de todos cuando por ejemplo nos referimos a las olas de calor, a las elevadas temperaturas de otoño o a la escasez de lluvias que estamos padeciendo. No obstante, el cambio ambiental que estamos experimentando va mucho más allá de las condiciones meteorológicas. En esta conferencia se presentaron los principales resultados del primer diagnóstico del Grupo de Expertos en Cambio Climático y Ambiental en el Mediterráneo (MedEC) sobre los motores que promueven el cambio ambiental en la cuenca mediterránea. Además del componente climático, se describieron patrones de contaminación atmosférica y marítima, fenómenos de invasiones biológicas por especies no autóctonas y cambios en los usos del suelo y los recursos pesqueros.

## ***INTRODUCCIÓN***

El informe internacional sobre las emisiones globales de carbono revela que los valores alcanzados en 2022 han batido récords y que no se aprecian signos de tendencia a la baja. Según los expertos, hay un 50% de posibilidades de que el calentamiento global de 1.5°C se sobrepase en los próximos 9 años (*Friedlingstein et al. 2022*). Para lograr que la UE sea climáticamente neutra de aquí a 2050, se deberían disminuir 1.4 GT de CO<sub>2</sub> cada año, un valor comparable a la caída observada en las emisiones del año 2020 como resultado del confinamiento al que estuvimos sometidos por la pandemia de COVID-19. Este objetivo requiere de un cambio en la estrategia del uso de la energía que n va a resultar titánico.

Estos son datos globales, pero las consecuencias del cambio climático no son homogéneas para todo el planeta. Además, el cambio climático es solo uno de los múltiples componentes del cambio global, al que hay que añadir fenómenos ambientales de gran impacto a escala mundial como son la contaminación, las invasiones biológicas o los cambios de uso de los ecosistemas. En este artículo resumiré los principales motores del cambio global en la cuenca del Mediterráneo.

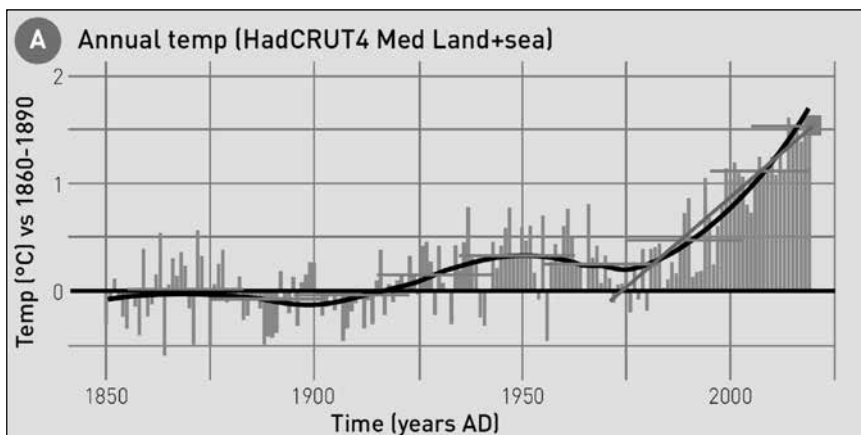
La cuenca bañada por el mar Mediterráneo es una región de elevada biodiversidad donde habitan un gran número de especies endémicas a pesar de la alta presión antrópica a la que ha estado sometida desde tiempos inmemoriales. El clima mediterráneo se caracteriza por presentar unos inviernos suaves y unos veranos muy calurosos y secos. Este clima ha dado lugar a una vegetación perenne y esclerófila para hacer frente a la sequía estival y a unos suelos relativamente pobres en nutrientes. Otra característica importante es la heterogeneidad biogeográfica con una marcada continentalidad a medida que nos alejamos de la costa hacia el interior.

La información presentada en este texto procede en su mayoría de la investigación fruto del primer diagnóstico MedEC, siglas que hacen referencia a *Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change*, una red internacional de profesionales fundada en 2015 que de forma independiente y voluntaria ofrece información de base científica de relevancia para la toma de decisiones y para informar al público en general.

### **CAMBIO CLIMÁTICO**

Podemos afirmar que la región mediterránea se calienta más rápido que la media global (Cherif et al. 2020). En la cuenca del Mediterráneo, la temperatura media anual supera en  $+1.5^{\circ}\text{C}$  a los niveles preindustriales (1860-1890), lo que supone un aumento de  $+0.33^{\circ}\text{C}$  por década (Figura 1). Las previsiones para finales de siglo no son alegadoras. En un escenario futuro, aunque las emisiones se redujeran de forma muy estricta (escenario denominado RCP 2.6) el aumento rondaría entre  $0.5^{\circ}\text{C}$  y  $2^{\circ}\text{C}$ ; mientras que si continuamos emitiendo como ahora (escenario RCP 8.5) el aumento será entre  $3.8^{\circ}\text{C}$  y  $6.5^{\circ}\text{C}$ .

**FIGURA 1**  
**SERIE TEMPORAL DE TEMPERATURA MEDIA EN LA CUENCA MEDITERRÁNEA EN COMPARACIÓN CON LA MEDIA PRE-INDUSTRIAL (1860-1890) SEGÚN CHERIF ET AL. (2020).**



También se prevé un aumento de las anomalías en las precipitaciones. A pesar de grandes diferencias entre regiones, a finales de siglo, las lluvias estivales se reducirán un 10-30% tomando el periodo de referencia 1980-1999. También se estima que las lluvias invernales decaigan, sobre todo en los países del norte de África donde pueden reducirse un 20-50%

En la cuenca mediterránea hay 180 millones de personas que viven en situación permanente de escasez de agua (<1000 m<sup>3</sup>/año per cápita). Si además tenemos en cuenta que el 75% de los recursos hídricos se consumen en los países del norte, mientras que en el sur y este es donde hay mayores necesidades, es fácil entrever escasez de recursos que promueva la migración de la población del norte de África hacia los países europeos. Además, para finales de siglo, se prevé un aumento de la demanda de agua del 4-18% en agricultura y del 22-74% en los hogares.

La variabilidad interanual de las nevadas será un rasgo característico de este siglo. Las pérdidas de masa de agua por nevadas a mitad de siglo se estiman en un 10-40%. Esta disminución de nevadas agravará la situación de la criosfera, perdiéndose volumen y área. En España, la mayor parte de los glaciares han retrocedido en altura. Por poner un ejemplo, el glaciar del Aneto ha disminuido en área de 245 a 49 ha desde la Pequeña Edad de Hielo hasta 2017, con una progresión que se ha agravado desde el año 2000 hasta la fecha (Campos et al. 2021). A finales de siglo, la progresión de pérdida de masa de los glaciares de las montañas de los países bañados por el mar Mediterráneo será de un 50% en el mejor de los casos, o la pérdida prácticamente total en algunas montañas del sur.

Los cambios de las variables climáticas del mar Mediterráneo han sido menos acusados que los de la atmósfera. Aun así, la temperatura superficial del agua ha aumentado 0.29°C en el oeste y 0.44°C en el este, en tan solo tres décadas (desde 1980).

Otro cambio importante es la reducción del pH del agua como consecuencia de la excesiva incorporación de CO<sub>2</sub>. El mar Mediterráneo absorbe relativamente más CO<sub>2</sub> por unidad de área que los océanos por dos motivos: es más alcalino y las aguas profundas se ventilan a mayor velocidad, lo cual permite que el CO<sub>2</sub> penetre más rápido en el interior. El proceso de acidificación hasta la fecha ya ha sido suficiente para ocasionar cambios en la calcificación de una amplia gama de organismos, no solo corales y gorgonias sino también algas, moluscos y crustáceos. Se prevé que la reducción del pH se acentuará en un futuro a la vez que probablemente aumente la salinidad del agua.

Finalmente, la tendencia observada en el aumento del nivel del mar ha pasado de 1.35 mm/año entre 1901 y 1990 a 3.7 mm/año entre 2006 y 2018. Para finales de siglo, el aumento puede llegar a ser de 37-90 cm (con alguna probabilidad de ser superior a 1 m) con respecto al 2000 (Thiéblemont et al. 2019).

## **CONTAMINACIÓN**

La contaminación atmosférica de la cuenca mediterránea por compuestos gaseosos (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>) es más elevada que en los países del norte de Europa. Esta contami-

nación es más acusada cuando hay periodos de sequía y elevada insolación. Muchas localidades de Italia, Francia y España sobrepasan más de 25 días al año los niveles de  $O_3$  troposférico permitidos por la UE ( $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Destaca también la contaminación por aerosoles y partículas ( $PM_{10}$ ) compuestas por polvo, cenizas, hollín, cemento, etc. cuya fuente principal es el tráfico y la industria, seguido de la erosión, y en menor grado por sedimentos naturales como los procedentes del desierto del Sáhara (Querol et al. 2004). Cuando se encuentran en altas concentraciones constituyen lo que llamamos “calima”. En muchas ciudades del este y sur de la cuenca mediterránea se sobrepasan con frecuencia los límites permitidos por la UE ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

El mar Mediterráneo es una de las masas de agua más contaminadas por plásticos del planeta, los cuales constituyen ya un 80% de los residuos mundiales. Solo un 9% de la producción se recicla, un 12% son incinerados y un 79% acumulados en vertederos. Su elevada vida media, en promedio tardan 50 años en descomponerse, supone que, aunque redujéramos drásticamente su uso, continuarían permaneciendo en el medio durante décadas. Además, es importante destacar que debido a las corrientes marinas hay zonas de elevada concentración que no son necesariamente las de mayor desecho. Las áreas de varamiento más importantes se localizan el Mar de Alborán, la costa de Algeria, el Golfo de Sidra y la costa Levantina.

Otros contaminantes marinos a destacar son los metales pesados traza, mayoritariamente Mg, Pb y Cd, con elevadas concentraciones en las aguas del centro y este de la cuenca. Además, existe una gran diversidad de contaminantes orgánicos (hidrocarburos policíclicos, detergentes, disruptores endocrinos, antibióticos, componentes estrógenos, esteroides, repelentes de insectos, etc.) cuyos impactos en la biota son cada vez más conocidos. En el Mar Menor se han detectado más de 20 productos farmacéuticos en el agua y 14 en los sedimentos (Moreno-González et al. 2014).

Un fenómeno de contaminación orgánica que ha ido aumentando es el de las mareas producidas por microalgas nocivas que según el tipo provocan decoloraciones; envenenamiento por amnesia, por diarrea o por parálisis; o producen sustancias mucilaginosas que no son tóxicas, pero que alteran las actividades recreativas. En los últimos 10 años ha habido un aumento significativo de casos de intoxicación por ingesta de marisco contaminado por este tipo de algas (Zingone et al. 2021). Este aumento de microalgas se debe en parte a la invasión por cianobacterias y diatomeas procedentes de otras regiones marítimas.

## **INVASIONES BIOLÓGICAS**

En los últimos 150 años, el Mediterráneo se ha colonizado por especies de origen Indo-Pacífico a través del canal de Suez (Azzuro y D’Amen 2023). Esta introducción de nuevas especies conocida como “migración Lesseptiana” se ha producido directamente por deriva o nado de individuos, pero también como polizones en las aguas de lastre o pegadas en los cascos de los barcos. El aumento del número de especies no autóctonas

ha aumentado a medida que el canal se ha ido ensanchando y se le ha dado mayor calado. Estas invasiones se han visto favorecidas por el calentamiento del agua, fenómeno conocido como “tropicalización”.

Además del canal de Suez, otra vía de entrada de especies marinas no autóctonas es la acuicultura. En promedio, cada año se detectan unas 20 nuevas especies. Actualmente el mar Mediterráneo alberga casi 1.000 especies no autóctonas, la mitad de las cuales son invertebrados seguidos por macroalgas (mayoritariamente rodófitos) y en menor medida peces.

En los ecosistemas terrestres la mayoría de especies no autóctonas son plantas, seguidas de invertebrados (especialmente insectos). Las vías principales de entrada suelen ser intencionales, a través de la jardinería o el mascotismo, pero también de forma accidental, como las plagas forestales y agrícolas.

El grado de invasión varía mucho entre países. Los países con índices de desarrollo humano e importaciones más altos albergan una gran densidad de plantas no autóctonas (Vilà y Pujadas 2001). Los paisajes más invadidos son aquellos altamente urbanizados, con redes extensas de vías de comunicación y con altas densidades de población. En las islas e islotes mediterráneos residen un gran número de especies no autóctonas, principalmente plantas. Por ejemplo, un análisis de 37 pequeñas islas italianas mostró que están invadidas por 203 especies de plantas, con un notable aumento de acacias y plantas suculentas en las últimas décadas. El número total de especies invasoras en los ecosistemas terrestres no se conoce, pero los hábitats naturales albergan más de 400 especies (Arianoutzou et al. 2013).

La velocidad a la que los humanos hemos movido especies más allá de sus rangos nativos ha aumentado enormemente en los últimos 150-200 años. Por ejemplo, Abellán y colaboradores (2016) han analizado datos sobre introducciones de aves en España y Portugal desde principios del siglo XX. Han encontrado que la mayoría de ellas (99.9%) se han registrado a partir de 1955, con un fuerte aumento después de los 80. Las aves de jaula (principalmente Passeriformes y Psittaciformes) constituyen la mayor parte de las especies introducidas durante los últimos 40 años a través de escapes de individuos mantenidos en cautiverio como mascotas.

Similar a lo contado con las invasiones marinas, se prevé que a medida que aumente la temperatura, las principales especies invasoras terrestres actuales se desplacen hacia el norte a un ritmo promedio de 37-55 km por década, dejando una ventana de oportunidad para especies mejor adaptadas a las condiciones xéricas del mediterráneo (Gallardo et al. 2017).

## ***CAMBIOS DE USO DEL SUELO Y DEL MAR***

Los cambios de uso del suelo han sido muy relevantes. El paisaje mediterráneo es un mosaico complejo de hábitats seminaturales, conocido también como paisaje cultural. En la 2ª mitad del siglo XX, en los países europeos de la cuenca se ha producido un abandono de cultivos y pastos que ha dado lugar a un aumento de la “matorralización”.

En la península Ibérica, por ejemplo, el área ocupada por matorral aumentó en un 29% entre 1989 y 2004. En cambio, en el norte de África, los cambios de uso del suelo han sido inversos. Áreas forestales se han convertido en explotaciones agrícolas y de pastoreo. La deforestación que han sufrido los países del norte de África entre 1980 y 1990 ha sido de las mayores del mundo.

Otros cambios importantes del uso del suelo reciente ha sido el aumento de la agricultura intensiva. Además, han aumentado las áreas metropolitanas alrededor de las ciudades, la densidad de vías de tráfico rodado, las áreas urbanas costeras y las áreas agrícolas periurbanas.

En el mar, los últimos 50 años se han caracterizado por la sobrepesca. Se ha producido una disminución del 90% de la biomasa y un descenso del 20-30% de tamaño de los peces. Algunas especies de peces, crustáceos y cefalópodos se han llevado casi hasta su extinción y un 41% de los grandes depredadores ya se ha extinguido. Estas tendencias han sido más acusadas en el oeste del mar Mediterráneo que en la costa central y oriental. En la costa oriental la pérdida de algunas pesquerías ha sido ocasionada por la depredación y la competencia con especies no autóctonas introducidas a través del canal de Suez de menor interés comercial.

## **CONSIDERACIONES FINALES**

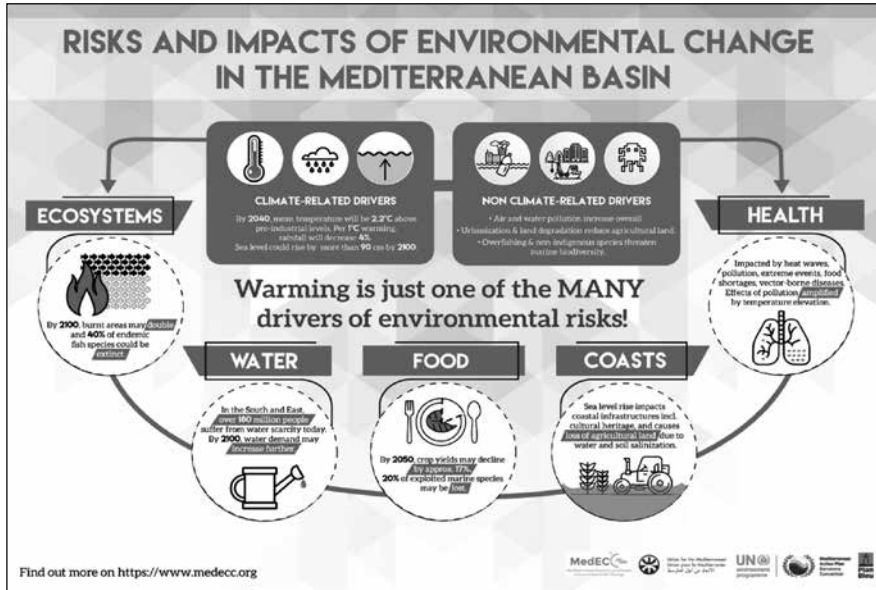
La cuenca mediterránea y su población están bajo amenaza inminente de daños debido al cambio climático, el aumento de la contaminación, la homogenización biótica por invasiones biológicas y la degradación de la tierra y el mar. Necesitaría preparar otra conferencia para describir todos los impactos ecológicos y socioeconómicos de estos cambios (Figura 2). A modo de listado, a escala ecológica local, son evidentes aceleraciones y desacoples en los ciclos de vida de los organismos, simplificaciones en las interacciones entre especies y extirpación de las mismas. A una escala espacial mayor, los impactos más significativos han sido la pérdida y la degradación de los humedales, la acentuación de los periodos de mortalidad forestal, la homogenización de los paisajes, el aumento de incendios forestales y la expansión de zonas áridas.

Es importante resaltar que los distintos componentes del cambio global que actúan simultáneamente, muchas veces con efectos sinérgicos o en cadena (Doblas-Miranda et al. 2017). Por mencionar algunos ejemplos, el aumento de la temperatura y la contaminación del aire acentúan las enfermedades respiratorias y cardiovasculares. El alargamiento de los periodos de altas temperaturas, alargan los periodos de actividad de mosquitos no autóctonos vectores de enfermedades infecciosas. Las sequías reducen las cosechas y la escasez de alimento que ocasiona migraciones de los países del norte de África hacia los países del sur de Europa.

Los niveles actuales de emisiones de efecto invernadero en la cuenca mediterránea representan el 6% del global, con una dependencia de la energía fósil del 76%. No obstante, las necesidades energéticas y uso de los combustibles fósiles son y seguirán siendo desiguales entre el norte y el sur. La demanda actual de la cuenca norte es de un 63%.

Por el contrario, se supone que el descenso de la población, la desindustrialización, la diversificación de la energía y las mejoras en la eficiencia energética disminuirán su uso del 10-23%. En cambio, en el sur, el aumento de la población, el desarrollo y la lentitud en la transición energética aumentarán la demanda energética entre un 55-118%.

**FIGURA 2**  
**RIESGOS E IMPACTOS DEL CAMBIO GLOBAL EN LA CUENCA MEDITERRÁNEA SEGÚN**  
**CHERIF ET AL. (2020).**



**AGRADECIMIENTOS**

Este artículo se enmarca dentro de los proyectos PID2021-122690OB-100 y EUR2022-134026 financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Agradezco a Alejandro Trillo los comentarios a una versión previa de este manuscrito. En 2020 la red de expertos Medec recibió el premio North-South del Consejo de Europa.

**BIBLIOGRAFÍA**

ABELLÁN, P., TELLA, J. L., CARRETE, M., CARDADOR, L., & ANADÓN, J. D. (2017). Climate matching drives spread rate but not establishment success in recent unintentional bird introductions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(35), 9385-9390.

ARIANOUTSOU, M., DELIPETROU, P., CELESTI-GRAPOW, L., BASNOU, C., BAZOS, I., KOKKORIS, Y., ... & VILÀ, M. (2010). Comparing naturalized alien plants and recipient habitats across an east–west gradient in the Mediterranean Basin. *Journal of Biogeography*, 37(9), 1811-1823.

- AZZURRO, E. & D'AMEN, M. (2022). Climate change paves the way for a new inter-ocean fish interchange. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 20(10), 558-563.
- CAMPOS, N., ALCALÁ-REYGOSA, J., WATSON, S. C., KOUKOULOS, I., QUESADA-ROMÁN, A., & GRIMA, N. (2021). Modeling the retreat of the Aneto Glacier (Spanish Pyrenees) since the Little Ice Age, and its accelerated shrinkage over recent decades. *The Holocene*, 31(8), 1315-1326.
- CHERIF, S., DOBLAS-MIRANDA, E., LIONELLO, P., BORREGO, C., GIORGI, F., IGLESIAS, A., ... & ZITTIS, G. (2020) Drivers of change. In: Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report [Cramer W., Guiot J., Marini K. (eds.)] Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/ MAP, Marseille, France, pp: 59-180, ISBN: 978-2-9577416-0-1
- DOBLAS-MIRANDA, E., ALONSO, R., ARNAN, X., BERMEJO, V., BROTONS, L., DE LAS HERAS, J., ... & RETANA, J. (2017). A review of the combination among global change factors in forests, shrublands and pastures of the Mediterranean Region: Beyond drought effects. *Global and Planetary Change*, 148, 42-54.
- FRIEDLINGSTEIN, P., O'SULLIVAN, M., JONES, M. W., ANDREW, R. M., GREGOR, L., HAUCK, J., ... & ZHENG, B. (2022). Global carbon budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811-4900.
- GALLARDO, B., ALDRIDGE, D. C., GONZÁLEZ-MORENO, P., PERGL, J., PIZARRO, M., PYŠEK, P., ... & VILÀ, M. (2017). Protected areas offer refuge from invasive species spreading under climate change. *Global change biology*, 23(12), 5331-5343.
- MEDEC ([https://www.medec.org/wp-content/uploads/2021/04/Rapport\\_MedEC\\_C\\_2\\_Drivers-of-change.pdf](https://www.medec.org/wp-content/uploads/2021/04/Rapport_MedEC_C_2_Drivers-of-change.pdf))
- MORENO-GONZÁLEZ, R., RODRÍGUEZ-MOZAZ, S., GROS, M., PÉREZ-CÁNOVAS, E., BARCELÓ, D., & LEÓN, V. M. (2014). Input of pharmaceuticals through coastal surface watercourses into a Mediterranean lagoon (Mar Menor, SE Spain): sources and seasonal variations. *Science of the Total Environment*, 490, 59-72.
- QUEROL, X., ALASTUEY, A., RUIZ, C. R., ARTIÑANO, B., HANSSON, H. C., HARRISON, R. M., ... & SCHNEIDER, J. (2004). Speciation and origin of PM10 and PM2. 5 in selected European cities. *Atmospheric environment*, 38(38), 6547-6555.
- THIÉBLEMONT, R., LE COZANNET, G., TOIMIL, A., MEYSSIGNAC, B., & LOSADA, I. J. (2019). Likely and high-end impacts of regional sea-level rise on the shoreline change of European sandy coasts under a high greenhouse gas emissions scenario. *Water*, 11(12), 2607.
- VILÀ, M., & PUJADAS, J. (2001). Land-use and socio-economic correlates of plant invasions in European and North African countries. *Biological conservation*, 100(3), 397-401.
- ZINGONE, A., ESCALERA, L., ALIGIZAKI, K., FERNÁNDEZ-TEJEDOR, M., ISMAEL, A., MONTRESOR, M., ... & TOTTI, C. (2021). Toxic marine microalgae and noxious blooms in the Mediterranean Sea: A contribution to the Global HAB Status Report. *Harmful Algae*, 102, 101843.



***CICLO DE CONFERENCIAS  
RASC-FUNDACIÓN CAJASOL***



## ***EL FUTURO DEL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA: BATERÍAS DE LITIO Y MÁS ALLÁ***

*Conferencia pronunciada por  
el profesor D. José Luis Tirado Coello,  
dentro del ciclo científico organizado  
a la Fundación Cajazol  
el día 15 de septiembre de 2022.*

### ***INTRODUCCIÓN: CAMBIO CLIMÁTICO Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA***

En la actualidad, es bien conocido que las emisiones globales de gases de efecto invernadero están contribuyendo al calentamiento global y que la actividad humana es responsable de una alta proporción de esas emisiones. Las predicciones sobre la evolución de este problema contemplan distintos escenarios para los cien próximos años. El escenario menos favorable se originaría por la ausencia de políticas climáticas que tiendan a disminuir la emisión, lo que llevaría a emisiones del orden de 150 Gt de gases con efecto invernadero equivalentes a dióxido de carbono, lo que estaría asociado a alcanzar incrementos de temperatura próximos a los 5 °C, con evidentes consecuencias catastróficas. Las políticas actuales, sin embargo, llevarían a incrementos que podrían oscilar entre, 2,5 y 3,0 °C, que son todavía claramente mejorables. De hecho, los escenarios más optimistas en los acuerdos de Cancún y de París han ido progresivamente bajando ese objetivo límite de incremento de temperatura, que se aproximaría a 1,5 °C en 2100 (<https://ourworldindata.org/co2-emissions>).

Por otra parte, la contribución a la generación de gases de efecto invernadero por el hombre puede tener distintos orígenes. La mayor parte de esta contribución se debe a la actividad relacionada con la energía, incluyendo transportes e industria, aunque también la agricultura y ganadería tienen aportaciones significativas. Contrariamente, los residuos y la industria química tienen una participación mucho menos importante. Por tanto, lo más destacado es todo aquello que tiene relación con la generación, transporte y utilización de la energía. Este hecho es debido fundamentalmente al uso de los combustibles fósiles, que son los responsables de esta emisión. La solución, sin duda, vendría por el uso eficiente de las energías renovables. El único problema es que las energías renovables, como puede ser la solar, la mareomotriz o la eólica, normalmente tienen el problema de ser intermitentes. Eso significa que la demanda de energía habitual es una onda que no suele estar en fase con la onda correspondiente a, por ejemplo, la energía solar accesible. Por tanto, hay dos amplias regiones temporales de desfase.

En una de ellas, la energía necesaria no está cubierta por la energía solar, mientras que en otro periodo de tiempo hay un exceso de energía solar accesible que compensaría las necesidades, si de alguna forma existiese un mecanismo de almacenamiento apropiado. Otras energías como la eólica, también tiene oscilaciones, aunque menos importantes, pero probablemente no sería suficiente para cubrir la demanda en ningún caso.

Aparte del almacenamiento para superar la intermitencia de las renovables, la distribución de la energía generada requiere un tratamiento relacionado, pues normalmente deben optimizarse tanto las redes de distribución, como el almacenamiento en lugares remotos donde no puedan tener acceso a las redes de distribución eléctrica. Por tanto, para todas estas actividades adicionales al aprovechamiento eficaz de las energías renovables, es necesario tener sistemas de almacenamiento de energía apropiados.

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden tener distintos orígenes y distintos fundamentos, y podemos encontrar aquellos que tienen un fundamento mecánico, como puede ser, por ejemplo, el fundamento cinético de los volantes de inercia o puede ser un fundamento gravitacional, como es el caso de la tecnología hidroeléctrica de bombeo. Podemos tener aspectos termodinámicos relativos a la presión, como el aire comprimido, o con la temperatura, en el almacenamiento térmico, que puede ser, entre otros, mediante sales fundidas o por el efecto termoeléctrico. El almacenamiento puramente eléctrico supone el uso de supercondensadores y el magnético de superconductores.

Finalmente, estaría el almacenamiento electroquímico, que a su vez tiene variantes importantes. La primera sería el almacenamiento electroquímico de hidrógeno, es decir, la obtención de hidrógeno por procedimientos electrolíticos recogidos bajo la denominación genérica de hidrógeno verde. El hidrógeno verde puede utilizarse después para generar energía eléctrica haciendo uso de las denominadas pilas de combustible, que es otro ejemplo de sistema electroquímico. El segundo grupo serían las denominadas baterías de flujo, actualmente en un desarrollo bastante rápido y que incluyen, por ejemplo, los sistemas de vanadio o de zinc-bromo. Finalmente, tenemos las baterías más convencionales, que incluyen desde acumuladores de plomo-ácido y níquel-cadmio hasta los más recientes, de iones de litio y sus posteriores revisiones.

En realidad, ninguna de estas formas de almacenamiento de energía por sí mismas serían capaces de responder a la necesidad de aprovisionamiento actual, con lo cual es imprescindible hacer uso de todas ellas simultáneamente. Esto ha sido reconocido por distintos investigadores, por ejemplo, Matthews and Wynes quienes han afirmado recientemente en la revista *Science* que es la única forma de dar flexibilidad a las fuentes de energías renovables (<https://www.science.org/doi/10.1126/science.abo3378>). En realidad, cada uno de estos sistemas puede tener una aplicación algo diferente a los demás por qué, por ejemplo, tenemos algunos sistemas que son capaces de alcanzar altos valores de potencia nominal, aunque necesitan un tiempo de descarga largo. Este sería el caso del hidroeléctrico de bombeo y del aire comprimido, que serían particularmente útiles para un control de potencia bruta, a pesar de poseer una eficiencia energética limitada. Para la nivelación de carga, que es lo que hemos mencionado anteriormente y las redes de distribución, las baterías son particularmente útiles y de los distintos tipos

comentados, las de iones de litio son las más versátiles y eficientes. Contrariamente, para liberación rápida de energía, los volantes de inercia y sobre todo los supercondensadores y la energía magnética los métodos magnéticos, serían particularmente útiles (<https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.028>). Esto también apoya el que no exista un único sistema de almacenamiento que nos pueda salvar de todos los problemas.

### **ALMACENAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE ENERGÍA. BATERÍAS**

Concentrándonos en las baterías, es conocido que pueden ser de dos tipos principales. Las baterías denominadas primarias o no recargables, que serían particularmente útiles en aquellas aplicaciones que las cuales no se dispone la posibilidad de realizar su recarga. Hay numerosas aplicaciones que necesitan por fuerza un sistema no recargable, por ejemplo, el seguimiento de animales, balizas para misiones de rescate, marcapasos, medidores de presión, relojes de ordenador, etc. Los sistemas no recargables van desde el clásico de Leclanché de zinc-dióxido de manganeso, pasando por la más moderna alcalina de manganeso, zinc-óxido de plata, zinc-aire y, finalmente, los sistemas con ánodo de litio que incluyen, por ejemplo, el litio-dióxido de manganeso, el litio-cloruro de tionilo o el litio-fluoruro de carbono. En cuanto a los voltajes que suelen dar estas baterías, teniendo en cuenta los valores de la mayoría de ellas, oscilan alrededor de 1,5 voltios. La batería de litio-dióxido de manganeso y cloruro de tionilo se aproximan bastante más a cuatro voltios.

Igual sucede con las baterías secundarias o recargables. Estas baterías necesitan cargarse primero antes de liberar la energía y podemos dividir las en dos grupos principales: las que trabajan a temperatura ambiente y las que trabajan a alta temperatura. Las baterías recargables que trabajan a temperatura ambiente incluyen desde los sistemas más clásicos, como la de plomo-ácido de finales del siglo XIX a otras como las de níquel-hierro, níquel-cadmio y níquel-hidruro metálico que se han ido desarrollando progresivamente a lo largo del siglo XX. Las baterías de iones de litio comenzaron su vida comercial a comienzos de los años 90 y, por último, las de zinc-aire comenzaron al final del siglo pasado. De nuevo, de todas ellas, la que proporciona un voltaje más alto, es sin duda la de iones de litio. En un segundo grupo, tenemos otras baterías secundarias que trabajan a temperaturas bien por encima de la temperatura ambiente, como por ejemplo la de sodio-azufre que se desarrolló en los años 70 sobre todo por la Ford Motor Company. Su mayor problema es que necesita para trabajar una temperatura en la que tanto el sodio como el azufre estén fundidos y lo único que está en estado sólido en estas baterías es el electrolito, que es fundamentalmente una beta alúmina, un óxido de aluminio y sodio. Como se comentó anteriormente, los voltajes altos no son la única ventaja del litio, sino al mismo tiempo, su capacidad de almacenamiento. Esta se puede medir como densidad de energía, habitualmente en miliamperios hora, bien por unidad de masa ( $\text{mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ ), también conocida como energía específica, o bien por unidad de volumen ( $\text{mA}\cdot\text{h}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). Ambos valores son especialmente elevados para los sistemas de iones de litio. La única batería que los superaría sería la que utilizaría un ánodo de litio

metal, lo cual tiene problemas de seguridad que actualmente se están intentando solventar, pero que todavía están por resolver completamente.

Por otra parte, las baterías de iones de litio tienen una gran versatilidad en el sentido de que podemos encontrar algunas baterías que tienen una densidad de energía, habitualmente expresada en vatios hora por kilogramo ( $W \cdot h \cdot kg^{-1}$ ), muy alta y otras que tienen una densidad de potencia ( $W \cdot kg^{-1}$ ) muy elevada. La densidad de potencia es muy importante en aquellas aplicaciones que queremos una liberación rápida de la energía, mientras que la densidad de energía lo es cuando queremos un almacenamiento mayor. Existe un amplio margen de variación de estos parámetros para las baterías de iones de litio, sobre todo si las comparamos con otros sistemas previos. Todo ello se debe, ni más ni menos, a las propiedades particulares del elemento químico litio, que, haciendo un poco de memoria, recordemos que fue Arfvedson el que lo descubrió en 1817 en un aluminosilicato del grupo de los feldespatos, el mineral petalita. El litio se sitúa en el sistema periódico, a la cabeza de los metales alcalinos, litio, sodio, potasio, rubidio, etc. Es, por tanto, el metal alcalino más ligero y el metal más ligero de todo el sistema periódico. A su vez tiene una configuración electrónica que es prácticamente la configuración electrónica del helio, los dos electrones 1s, y un electrón adicional en el orbital 2s. Ese electrón adicional se puede perder con cierta facilidad. Sin embargo, no se pierde tan fácilmente como en los restantes elementos de su grupo, pero el ion resultante es tan pequeño— es un ion con la configuración electrónica del helio —que se solvata, es decir, se coordina por otras moléculas en el disolvente, liberando una alta energía de solvatación, que finalmente conduce al potencial más reductor de todo su grupo. De hecho, este es el metal más reductor de todos y tiene un potencial de  $-3,04$  V referido al electrodo de hidrógeno. Si a eso le sumamos que es el metal más ligero, con un peso atómico de menos de 7 g por mol y una densidad de  $0,535$  g  $cm^{-3}$ , aproximadamente la mitad del agua, podemos pensar que su capacidad de almacenar energía eléctrica debe ser muy alta. Efectivamente, alcanza los  $3.862$  mA  $\cdot$  h  $\cdot$  g $^{-1}$ , la capacidad gravimétrica más elevada que podemos encontrar en ningún metal del sistema periódico.

Sin embargo, el litio metal tiene un problema particularmente importante. Al cargar una batería que utiliza un ánodo de litio, los iones de litio de la disolución se aproximan al ánodo, se reducen y depositan sobre el metal, pero de forma poco regular. De hecho, la reconstrucción de la superficie del litio es particularmente mala. En un ciclo se crearían pequeñas protuberancias, pero tras varios ciclos, van desarrollándose, dando lugar a la formación de ramificaciones llamadas dendritas. Tras un número suficientemente alto de ciclos, esas dendritas son capaces de atravesar el separador que aísla el ánodo del cátodo, produciendo cortocircuitos. Esto a su vez origina la combustión con fuga térmica de los disolventes orgánicos que necesitan los electrolitos de estas baterías, para dar lugar a incendios o explosiones. Esos fenómenos tan peligrosos en las baterías recargables con ánodo de litio metal (no en las primarias) condujeron, por ejemplo, al hundimiento de empresas importantes que las fabricaban a principios y mediados del siglo XX, como puede ser, por ejemplo, la empresa Moli Energy Ltd. en Canadá. Esta empresa utilizaba un cátodo de disulfuro de molibdeno. El disulfuro de molibdeno es un compuesto con una estructura laminar en la cual tenemos los átomos de molibdeno

en una coordinación de prisma trigonal. Mientras que entre estas láminas de prismas se definen unos huecos octaédricos donde se aloja el litio. Pues bien, esa que es la fase alfa o fase molibdenita, cuando se descarga la batería, es decir, cuando se inserta litio en su interior, cambia la coordinación del molibdeno y pasa a tener una coordinación también octaédrica (fase beta). Una vez alcanzada esta situación, ya vuelve siempre a través de esa fase beta. Hasta ahí todo muy favorable, pero debido a la formación de dendritas de litio hubo un gran número de accidentes y finalmente la empresa entró en suspensión de pagos en 1989. (<https://books.google.es/books?id=kJaGAAAACAAJ>).

## **LAS BATERÍAS DE IONES DE LITIO**

Hubo, por tanto, que recurrir a sustituir el ánodo de litio por algo diferente, que puede ser otro compuesto en el cual se almacena el litio, preferentemente un compuesto de intercalación. Se trata de una red sólida que actúa de anfitrión y un ion huésped, que en este caso sería el litio, que se sitúa en su interior sin alterar grandemente la estructura básica del material de partida. La inserción/extracción del litio en forma de iones simultánea a una corriente de electrones hacia/desde el sólido anfitrión es lo que se conoce como una reacción de intercalación/desintercalación electroquímica. Pues bien, si sustituimos el ánodo de litio por un compuesto de intercalación que trabaje un potencial bastante más próximo al del litio que el cátodo, podremos construir una batería completa de iones de litio que suministre un voltaje suficientemente elevado, como sería la primera que se comercializó por Sony en el año 1991 y que constaba de un ánodo formado por grafito o carbones menos organizados como los coques de petróleo, en los que puede insertarse el litio entre las láminas de carbono. El cátodo, en este caso, fue un óxido de litio y cobalto que ya lleva el litio dentro de la estructura. Para cargar la batería, hay que extraerle el litio, pasarlo al electrolito y, finalmente intercalarlo en el ánodo de carbono. Ese sería el proceso de la carga en el que simultáneamente, los electrones tienen que pasar por el circuito externo para mantener la electroneutralidad. Respecto al electrolito, por cierto, es una sal de litio, como perclorato o hexafluorofosfato, en disolventes orgánicos del tipo de los carbonatos orgánicos. Durante la descarga, el proceso sería inverso, el litio se libera del grafito, se transporta por electrolito y vuelve a insertarse en el óxido laminar. Este movimiento de vaivén de los iones de litio yendo de un extremo a otro de la batería, hizo que inicialmente se llamaran baterías tipo mecedora porque el litio iba meciéndose entre los electrodos. Desde los primeros productos comerciales de Sony le dieron el nombre de *Li-ion*, que quedó en iones de litio en castellano.

Podemos considerar que las baterías de iones de litio han sido una historia de éxito durante los tres últimos decenios. El éxito ha surgido desde varios puntos de vista. Por ejemplo, desde el punto de vista puramente académico se reconoció su impacto con la concesión del Premio Nobel de Química de 2019 a tres investigadores dentro de este campo, como son los profesores Yoshino, Goodenough y Whittingham. Lamentablemente, el profesor John B. Goodenough falleció hace poco a la edad de cien años, una gran pérdida para la comunidad científica.

Aparte de los aspectos académicos, tenemos que la densidad de energía desde que se comercializó la primera batería de iones de litio ha ido aumentando progresivamente hasta hace poco. Al mismo tiempo el precio, que inicialmente era del orden de más de 1.000 dólares USA por kW·h, ha ido a la vez disminuyendo considerablemente, aproximándose a 100 dólares por kW·h. Sin embargo, en los últimos años se aprecia un cierto carácter asintótico de estas tendencias. Eso significa que poco a poco estamos llegando a los límites tanto de la capacidad de almacenamiento como de la disminución en el precio. De todas formas, esta secuencia ha permitido que las aplicaciones de las baterías de iones de litio hayan sido progresivamente más exigentes. Así, comenzaron como fuentes de alimentación de electrónica portátil, teléfonos móviles, ordenadores portátiles. Posteriormente pasaron a alimentar herramientas eléctricas, drones o más recientemente, vehículos eléctricos para el transporte, ya sean vehículos de bajo consumo eléctrico, como estos patinetes que tanto han proliferado recientemente, como en el caso del automóvil eléctrico. Finalmente, también se están aplicando en los sistemas de almacenamiento para el hogar. Ahí se deja ver el éxito progresivo que ha sido debido, entre otros motivos, a los avances fundamentales en el conocimiento de los materiales de electrodo.

Tanto para el cátodo como para el ánodo, los materiales utilizados han sufrido una evolución importante. En el caso del cátodo, los sistemas iniciales utilizaron el óxido de litio y cobalto mencionado antes, si bien, en la actualidad se tiende a los óxidos de níquel, manganeso y cobalto ricos en litio. Un segundo grupo de cátodos utiliza la espinela de litio y manganeso, a la que posteriormente se ha conseguido aumentar su voltaje de trabajo, añadiendo níquel en la composición. Finalmente, el fosfato de litio y hierro con estructura tipo olivino y algunos fluorofosfatos más recientes constituyen un tercer grupo. En cuanto al ánodo, el material de más éxito fue y sigue siendo el carbono en formas más o menos gráficas. Posteriormente se comprobó la utilidad de formar las aleaciones y compuestos intermetálicos de litio, como el de litio con silicio o litio con estaño. Finalmente, son ánodos útiles los óxidos de inserción de litio con estructura espinela que trabajan a voltaje más bajo que los de manganeso, como el óxido de titanio y litio,  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ . Por último, mencionar algunos compuestos que intervienen en reacciones de conversión.

Comenzando por los óxidos laminares, el óxido de litio y cobalto de la primera batería de Sony es un material cuya reacción electroquímica se conoció relativamente pronto, ya que fue descrita por Goodenough en el año 1980. La reacción implica la extracción o la inserción del litio de la interlámina situada entre capas de octaedros  $\text{CoO}_6$  que comparten aristas en el plano. Cuando se extrae el litio, el voltaje aumenta y la celda unidad se expande, porque el litio tiene el papel de una carga que compensa las cargas negativas de las láminas de óxido de cobalto. Es un proceso reversible que implica cambios en el estado de oxidación del cobalto de entre cobalto +3 y cobalto +4.

Posteriormente, algunos miembros de nuestro grupo de investigación contribuimos, por ejemplo, al estudio de métodos de síntesis del óxido de litio y cobalto, como el método que utiliza un citrato precursor. Del mismo modo, aportamos la determinación estructural detallada de un análogo a este compuesto, pero con níquel, litio y oxígeno y al



---

estudio de su comportamiento electroquímico. Posteriormente, obtuvimos disoluciones sólidas entre el óxido de litio y níquel y el óxido de litio y cobalto, y con algo de aluminio o galio en su composición. Así mismo, estudiamos el cambio en los mecanismos de intercalación de los óxidos mixtos obtenidos a distintas temperaturas, observando cambios importantes desde un mecanismo bifásico a monofásico al bajar la temperatura de preparación. Los estudios de resonancia magnética nuclear permitieron analizar con detalle la sustitución por aluminio, una sustitución que posteriormente se utilizó con frecuencia en los sistemas comerciales (<https://doi.org/10.1007/s100080050138>). En la actualidad, la tendencia en los óxidos laminares es ir eliminando lo más que se pueda el cobalto, que es caro y poco abundante, aparte de tóxico. Simplemente por la sustitución de parte del cobalto por manganeso y níquel es posible pasar de 150 a 180 mA·h·g<sup>-1</sup>. Si, además, añadimos más litio en las láminas de los metales de transición podemos alcanzar capacidades próximas a los 270 mA·h·g<sup>-1</sup>.

Pasando a los cátodos con estructura relacionada con la del mineral espinela (óxido mixto de magnesio y aluminio), que en el caso de los cátodos es un óxido de litio y manganeso. Su estructura contiene una serie de octaedros de oxígenos rodeando al manganeso que comparten aristas, dando lugar a cadenas que se entrecruzan con otras cadenas y dejan entre ellas unos huecos tetraédricos donde se aloja el litio. A partir de su estequiometría, LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, si hacemos un ajuste de estados de oxidación, el manganeso está en estado de oxidación intermedio entre más tres y más cuatro. Esto que significa que lo podemos oxidar todavía más a la vez que extraemos el litio de la estructura, hasta alcanzar el estado de oxidación Mn<sup>4+</sup> y obtener la fase lambda del dióxido de manganeso, que es una espinela con los huecos tetraédricos vacíos de litio. O bien, podemos añadir más litio reduciendo el manganeso 4+ que hay inicialmente a manganeso 3+. Esta posibilidad presenta un problema porque el Mn<sup>3+</sup> tiende a distorsionar los octaedros de oxígenos por un efecto conocido como Jahn-Teller, lo que conlleva una distorsión estructural importante. La desintercalación puede llevarse a cabo tanto por vía química mediante tratamiento ácido, como por vía electroquímica. De nuevo fue Goodenough el descubridor de esta posibilidad. Posteriormente, otros autores lo utilizaron en baterías frente a los coques de petróleo y su utilización todavía sigue dando productos comerciales.

Por nuestra parte, estudiamos las espinelas sustituidas parcialmente por níquel en los octaedros ocupados por manganeso. Esa sustitución puede darse de forma ordenada o desordenada, lo que detectamos mediante diagramas de difracción de neutrones que realizábamos en aquella época en el ILL de Grenoble. En este mismo sistema estudiamos en la Universidad de Córdoba el mecanismo de reacción, distinguiendo que transcurría mediante la coexistencia de dos fases y no por una única fase. Al mismo tiempo, mejoramos el método de síntesis para evitar la formación de manganeso trivalente. Finalmente, en estas espinelas propusimos distintas disoluciones sólidas, en las que se cumple bastante bien la relación estructural conocida como ley de Vegard y con las que mejora además la estabilidad de la capacidad durante un mayor número de ciclos electroquímicos (<https://doi.org/10.1021/cm034080s>).

En cuanto a los fosfatos, el fosfato de litio y hierro es también un material del cátodo bastante frecuente. Su estructura es la del mineral olivino, un neso(orto)silicato, pero en este caso, lo que tenemos es un anión fosfato en lugar del grupo silicato. Los aniones fosfatos no comparten oxígenos con otros grupos fosfatos, sino que lo hacen con octaedros  $\text{FeO}_6$ . Todo ese armazón deja mucho espacio abierto a través del cual, el litio se puede transportar con facilidad. Su inserción y desinserción se dan a un voltaje próximo a 2,8 V. De nuevo, fue Goodenough el que descubrió ese hecho.

Por nuestra parte, en estos fosfatos hemos estudiado varios aspectos con vistas a solucionar algunos de sus problemas. El primero es que el hierro tiende a disolverse en el electrolito durante su utilización, porque reacciona cuando hay fluoruros presentes en el electrolito. En este sentido, estudiamos la posibilidad de recubrir el fosfato con óxidos como el zinc, que pudieran tener un efecto secuestrador de los fluoruros. De esta forma, se estabiliza mucho más la capacidad durante los ciclos de carga y descarga prolongados. Al mismo tiempo, estudiamos su comportamiento mediante espectroscopia Mössbauer, que es una espectroscopia nuclear extremadamente selectiva para algunos elementos como el hierro, permitiendo conocer su estado de oxidación y de espín, así como la simetría de su entorno (<https://doi.org/10.1002/9781118714614.ch28>). Otro problema del fosfato de litio y hierro es su baja conductividad eléctrica, lo cual normalmente se evita mediante aditivos de carbono, pero esos aditivos de carbono tienen que homogeneizarse muy bien con el material activo para que respondan. En este sentido, nosotros estudiamos sustituir el carbono por polímeros conductores, como por ejemplo el poli(3,4-etilendioxitiofeno) (PEDOT), lo que permite reducir considerablemente la resistencia interna respecto al material estándar, con lo cual la velocidad de carga y descarga puede aumentar mucho más, procedimientos patentados con ABENGOA (<https://encrypted.google.com/patents/WO2015082711A1?cl=un>). También abordamos la posibilidad de utilizar cobalto en la estructura en vez de hierro para de esta forma aumentar el voltaje de trabajo, lo cual presenta un problema para la estabilidad de los electrolitos, pero optimizando la geometría de las partículas a veces se puede evitar en parte.

Pasando a los ánodos de las baterías de iones de litio convencionales, puede mencionarse que de nuevo el grafito fue una de las primeras opciones. El grafito puede intercalar hasta un átomo de litio por cada seis átomos de carbono, porque en su estructura intercalada los litios deben estar suficientemente separados y eso hace que la capacidad de almacenar litio del grafito cristalino no supere los  $372 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ . Esta capacidad, que es una capacidad relativamente baja, puede superarse, por ejemplo, con carbones más desorganizados. Como, por ejemplo, los estudiados por el Nobel Yoshino que incluyen fragmentos de grafito que conforman una estructura parecida a una montaña de cartas caídas, o láminas curvadas, que en ambos casos dejan un gran espacio donde almacenar litio, pudiendo por tanto aumentar considerablemente la capacidad específica.

En este sentido, nosotros estudiamos distintos materiales de grafito poco cristalinos, por ejemplo, coque de petróleo, suministrados por Repsol, en aquella época, Repsol YPF, en los que hicimos distintos estudios para demostrar, por ejemplo, el efecto de la temperatura de tratamiento térmico sobre la capacidad que podían alcanzar, observando que a bajas temperaturas se podía superar al grafito, mientras que a temperaturas

intermedias no, por formación de un producto turbostrático. Igualmente, ensayamos distintos nanocarbones, en la época del boom de la nanociencia y la nanotecnología, incluyendo nanotubos de carbono, y microesferas de mesofases.

Como he mencionado, la capacidad del carbono está realmente limitada y una alternativa de mayor capacidad son, sin duda, las aleaciones y compuestos intermetálicos de litio. En concreto, el silicio alcanza una estequiometría próxima a cuatro litios por silicio, aunque su capacidad real ( $3.600 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ ) es prácticamente la misma que la del litio metal. Otros metales que también forman intermetálicos con el litio son el estaño, con capacidad teórica próxima a  $995 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ , y el antimonio, con  $660 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$  de capacidad). Es decir, que son prácticamente el doble, el triple, e incluso diez veces más que el grafito. El problema que tienen estas aleaciones es que durante el proceso de inserción y desinserción su volumen cambia muchísimo, hasta tres veces en el caso del silicio, dos veces y media para el estaño, etc. Esto se debe a que los compuestos intermetálicos de silicio con contenido de litio en aumento contienen estructuras cada vez más expandidas. Esto implica que hay una expansión muy grande durante la inserción y una contracción marcada durante la extracción del litio, dando lugar a un fenómeno similar a lo que sucede, por ejemplo, en un lago arcilloso seco, donde las láminas de arcilla se cuartejan al contraerse. En el caso de un electrodo, este deterioro es particularmente dañino, ya que se pierde el contacto eléctrico entre regiones del material activo, reduciéndose acusadamente la capacidad.

En nuestro caso, lo que hicimos fue sustituir el estaño puro por compuestos intermetálicos de estaño con cobalto, hierro, cromo o antimonio. Adicionalmente, sintetizamos materiales nanoestructurados, mejorando de esta forma su comportamiento, y estudiándolos por técnicas como la espectroscopia Mössbauer de estaño. Además, en el caso del antimonio contemplamos sus intermetálicos con cobalto o con cromo, con estructuras como la skutterudita o la marcasita, que se destruyen durante la primera descarga y dan lugar al intermetálico de litio con antimonio. Finalmente, estudiamos un compuesto de estaño y antimonio que contiene dos elementos que son electroactivos. Este compuesto también se destruye inicialmente y tanto el estaño como el antimonio forman sus correspondientes intermetálicos con litio. Este proceso se puede seguir utilizando la espectroscopia Mössbauer tanto de estaño como de antimonio, siendo un material bastante interesante desde un punto de vista fundamental y por su posible aplicación ([https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00125-0](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00125-0)). Finalmente, mencionar el último tipo de ánodos de las baterías de iones de litio convencionales que todavía no ha recibido la explotación necesaria, y que fue concebido por Tarascon en el año 2000 (<https://doi.org/10.1038/35035045>). Son compuestos que se conocen por dar reacciones de conversión, como los monóxidos de metales de transición, que son capaces de reducirse por el litio de manera electroquímica para dar los metales de transición y óxido de litio y ese proceso es reversible. Nosotros analizamos en este grupo de ánodos los óxidos mixtos de níquel y cobalto, cobalto y hierro, cobre y hierro, etc., estudiando su comportamiento mediante espectroscopia Mössbauer y comprobando como podían mediante los métodos de síntesis adecuados, tener capacidades próximas a los  $900 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ . Posteriormente, extendimos el concepto de reacción de conversión a otros compues-

tos, como por ejemplo el caso de oxisales como carbonatos y oxalatos de hierro o el malonato de cobalto. En el caso de los oxalatos de hierro, estos se pueden preparar como nanocintas, a partir de un procedimiento que utiliza micelas inversas, obteniendo capacidades muy elevadas. En el caso de los malonatos de cobalto, su uso como material activo del ánodo se protegió además en una patente (<http://www.google.com/patents/WO2011124644A1?cl=en>) que forma parte del portafolio de patentes del instituto ALISTORE, el cual resultó de la red de excelencia europea del mismo acrónimo, y en la que participamos durante bastantes años.

### ***SOSTENIBILIDAD Y SEGURIDAD DE LAS BATERÍAS DE IONES DE LITIO***

Como consecuencia de todos los avances y todas las ventajas de las baterías de iones de litio antes comentadas, la demanda de litio ha ido aumentando enormemente en los últimos años. Simultáneamente, la fracción del litio que se utiliza para baterías en comparación con otras aplicaciones también ha aumentado dramáticamente, y se espera que en los próximos años esa aplicación suponga la mayor parte de la utilización del litio que se extrae. Además de eso, si extrapolamos la cantidad de litio que se extrae tanto para baterías como para otras aplicaciones, incluso en un escenario que sea poco exigente con las baterías, aumentaría muchísimo en los próximos años. En un escenario en el cual las baterías de iones de litio fuesen la única forma de almacenamiento de energía electroquímica, la cantidad necesaria del elemento que se necesitaría extraer sería prácticamente inviable. Si a eso le sumamos el hecho de que el litio no es particularmente abundante, se estima que las reservas totales de litio pueden estar alrededor de los 44 millones de toneladas, y lo que es más importante, que esas reservas no se encuentran uniformemente distribuidas en la naturaleza, el problema de sostenibilidad es difícil de superar. Desde el punto de vista geográfico, tenemos regiones muy ricas en el elemento como pueden ser, por ejemplo, el denominado triángulo de litio, que sería el triángulo entre Bolivia, Argentina y Chile, en las cuales yacimientos como el de Atacama contienen depósitos salinos con enormes cantidades de litio, pero que actualmente no se están extrayendo y no tienen una política de extracción suficientemente desarrollada. En otros lugares los yacimientos consisten en minerales que han de extraerse en canteras y posteriormente realizar tratamientos que consumen bastante energía, haciendo mucho más caro extraer el litio, y que generan problemas medioambientales. Esos minerales se encuentran en muchos lugares del mundo, especialmente en China y Estados Unidos (<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.01.017>). Incluso ya sabemos que en España la explotación por la empresa New Energies, filial española de Infinity Lithium, del nuevo yacimiento de Extremadura dependerá de que se superen las implicaciones medioambientales, como se demuestra por la existencia de la plataforma Salvemos La Montaña de Cáceres. En resumen, hay muchas posibilidades, pero repletas de dificultades en la mayor parte de los casos.

Si a lo anterior le sumamos el precio del litio, cuya evolución referida al precio del carbonato de litio se ha disparado en los últimos años, contrastando, por ejemplo, con

el carbonato de sodio que prácticamente no ha cambiado, vemos que el encarecimiento del litio puede ser un problema real para la sostenibilidad de estos sistemas de almacenamiento de energía. Por otra parte, como se mencionó anteriormente, el cobalto suele ser un componente bastante frecuente en las baterías de iones de litio y el cobalto es caro. Su precio, fluctúa mucho y puede llegar a triplicarse en menos de un año, lo que genera también una preocupación seria acerca de la sostenibilidad real de las baterías de iones de litio. Por otro lado, un segundo motivo de preocupación sobre las baterías de iones de litio tiene su origen en sus problemas de seguridad. Constantemente aparecen noticias acerca de incidentes graves causado por estas baterías, como incendios que se producen en teléfonos móviles, ordenadores portátiles, vehículos eléctricos, e incluso en hogares y aviones, lo que implica que la seguridad de estos sistemas todavía no ha alcanzado su nivel óptimo.

### **MAS ALLÁ DEL LITIO. BATERÍAS DE IONES DE SODIO**

Todos los problemas antes aludidos han llevado a muchos investigadores y a diversas empresas a pensar en la posibilidad de ir más allá del litio, es decir, no quedarnos solamente en este elemento sino pasar a otras alternativas, que pueden estar dentro de los metales alcalinos, como puede ser el sodio o el potasio. Además, es posible extenderse a otros elementos que pueden alcanzar un estado de oxidación más alto que los alcalinos y, por tanto, liberar más electrones que el litio, como pueden ser los alcalinotérreos magnesio y calcio, o el zinc, que liberan dos electrones, o el aluminio que podría llegar a liberar hasta tres electrones por átomo. Puede hacerse una pequeña comparación inicial de esas opciones para resaltar las ventajas de cada uno. El litio, sin duda, se caracteriza por tener el potencial más reductor de todos, como ya se ha mencionado, y por tener la capacidad gravimétrica más alta que ninguno de ellos. Sin embargo, es mucho menos abundante que los demás, muy de cerca del zinc en este aspecto, mientras que sodio, aluminio o calcio son mucho más fáciles de encontrar en la naturaleza y, desde el punto de vista económico, de obtención menos costosa. Desde el punto de vista de la capacidad por unidad de volumen, el aluminio sería el más favorable, aunque su potencial tampoco es particularmente bajo. El sodio no destaca en ninguno de estos aspectos concretos, aunque es bueno en todos ellos.

Aparte de estas propiedades generales, hay que tener en cuenta otras propiedades importantes como puede ser la posibilidad de formar aleaciones con aluminio. Porque en las baterías de iones de litio, el ánodo no puede tener un colector de corriente de aluminio que es barato y que se utiliza en el cátodo, porque el litio forma aleaciones con el aluminio. Hay otros metales que también las forman, por ejemplo, el magnesio. Sin embargo, el sodio no forma estas aleaciones. Eso implica que podemos sustituir los colectores de corriente de cobre por otros de aluminio, que son más ligeros y significativamente más baratos.

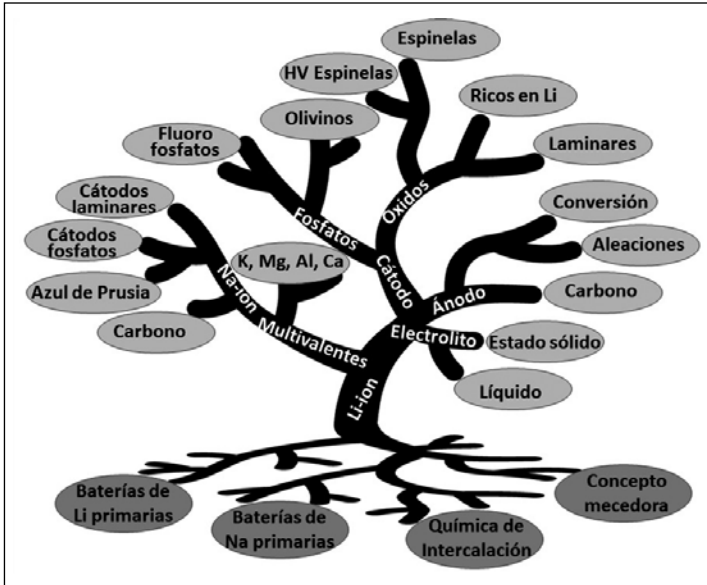
Por otra parte, el sodio tiene otra ventaja adicional: tiene una base científica muy próxima a la del litio, que puede apreciarse en el árbol del conocimiento de la figura 1,

por lo que mucho de lo que se sabe del litio se puede extrapolar al sodio. De hecho, las raíces de estas baterías son el concepto “mecedora”, la química de la intercalación y las baterías primarias de ambos elementos, desarrolladas en gran medida por el laureado Prof. Whittingham y otros. En el caso del litio han dado lugar a un desarrollo con una ramificación muy amplia de los distintos materiales de electrodo que hemos mencionado anteriormente, mientras que en el caso del sodio es más incipiente, aunque ya hay una notable variedad de materiales que va desarrollándose en ramas cada vez más eficientes y que ha ramificado a los restantes elementos mencionados. Estos avances han permitido que muchos trabajos científicos y revisiones hayan sugerido que el sodio puede ser un buen candidato para sustituir al litio, especialmente en aquellas aplicaciones donde lo que buscamos no es la máxima densidad de energía, sino una densidad de energía aceptable a un precio y a una sostenibilidad necesarios. En esos casos, se podrían utilizar sistemas de iones de sodio, que, por analogía con los iones de litio, tendrían ese movimiento de mecedora de los iones en la disolución del electrolito. De esta forma, las aplicaciones fundamentales podrían estar en el aprovechamiento de las energías renovables. Esa posibilidad se ha dejado notar en la producción científica, que ha sufrido un aumento exponencial del número de publicaciones y del número de citas relativas a los sistemas de iones de sodio.

Desde el punto de vista industrial, es de destacar que actualmente hay muchos fabricantes que están ya a punto de lanzar sus productos comerciales de iones de sodio y algunos ya lo han hecho a pequeña escala. Estas empresas se encuentran ubicadas en tres continentes. Por ejemplo, en Reino Unido tenemos las empresas Faradion y AmtePower que incluso ya tienen elaborados catálogos donde se pueden ver estos productos. En Suecia destaca la empresa Altris, cuyas baterías están también en una situación bastante avanzada, en Francia, Tiamat, en Estados Unidos, Natron Energy y en China hay numerosas empresas, algunas de ellas ya fabrican algún producto, sobre todo para vehículos eléctricos ligeros. Entre ellas, CATL parece ser pionera en estos sistemas. Además, las características de los productos que están preparando algunas de estas empresas han mejorado mucho con el tiempo. Por ejemplo, los de Faradion han ido progresivamente aumentando la densidad de energía (<https://doi.org/10.1039/D1TA00376C>) de sus sistemas. En comparación con las baterías de litio, que evidentemente en la actualidad todavía tienen mucha más densidad de energía, los prototipos de Faradion se van aproximando en capacidad, e incluso han llegado a superar algunos sistemas de litio de los años 90. La empresa prevé que sus baterías de iones de sodio superen pronto a otros sistemas de iones de litio, por ejemplo, a las baterías de fosfato de litio y hierro, por lo que podemos pensar que esta es una de las opciones más viables dentro de las alternativas al litio.

De nuevo, los avances en estos sistemas están unidos a las mejoras en los cátodos, los cuales pueden ser óxidos laminares parecidos al óxido de litio y cobalto, pero con sodio, u otras variantes estructurales. Otros están relacionados con el azul de Prusia, y son ferrocianuros de metales de transición y sodio. Igualmente, han tenido éxito los fosfatos relacionados estructuralmente con superconductores iónicos de sodio (NASICON). En el caso de los ánodos, los que más han sido utilizados son los denominados

FIGURA 1  
ÁRBOL DEL CONOCIMIENTO SOBRE BATERÍAS DE IONES METÁLICOS



carbones duros, que no son grafitizables, aunque también se han considerado aleaciones, compuestos de intercalación con estructura espinela u óxidos de conversión.

Comenzando por el cátodo, tal vez estos óxidos laminares tienen una mayor riqueza estructural que en el caso del litio, porque podemos encontrar diversas modificaciones. Entre ellas, existe la denominada O3 donde el sodio está en huecos octaédricos en coordinación octaédrica de oxígeno, y que es estructuralmente análoga al óxido de litio y cobalto antes mencionado. En otra, que se conoce como P2, los sodios están en coordinación prismático trigonal. Esta coordinación tiene la ventaja de que los prismas comparten caras cuadradas y la difusión del sodio es más rápida que en el caso de la modificación O3. Sin embargo, admite menos sodio, solamente  $\frac{3}{4}$  por fórmula, y da reacciones irreversibles de conversión a otras fases, entre las que se encuentran la O2, con coordinación octaédrica del sodio, o la OP4 que contiene sodio en coordinación tanto octaédrica como prismático trigonal. Esas reacciones tienen lugar dependiendo de la composición química, al igual que otro fenómeno: el oxígeno no es inerte. De hecho, tiene una química redox relevante a alto voltaje para algunas composiciones, que puede aumentar la capacidad específica, pero deteriorar el comportamiento final si se da el desprendimiento de oxígeno molecular. Luego el avance requiere aquí también grandes esfuerzos, que actualmente se están desarrollando extensamente en centros de investigación de todo el mundo. En nuestro caso, intentamos optimizar en estudios previos los métodos de síntesis de la modificación P2, bien sustituyendo parcialmente el níquel de las composiciones por otros elementos como hierro, magnesio o zinc, o estudiando una modificación alternativa como es la P3. En la actualidad seguimos estudiando

estos sistemas en el marco del proyecto PLEC2021-007779 con título “Electrolitos y electrodos innovadores para una nueva generación de baterías de sodio para aplicaciones estacionarias (NABASTAT)”, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR, con participación de la empresa valenciana Power Electronics y la Universidad de Alicante.

En cuanto a los fosfatos. El más versátil es un fosfato de vanadio y sodio, con composición  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ , que se conoce por el acrónimo NVP, y que posee una estructura tipo NASICON, lo cual significa que el sodio tiene una elevada movilidad en su interior. La estructura se forma a base de unidades llamadas linternas, que consisten en dos octaedros de oxígeno con vanadio en el centro unidos por tres tetraedros con fósforo. Estas unidades se unen entre sí, definiendo huecos donde se alojan los sodios. Algunos de ellos están llenos o parcialmente llenos de sodio y otros vacíos. Todos ellos pueden acabar de llenarse, o bien se pueden vaciar los que están ya llenos o parcialmente llenos. Cada uno de esos procesos se da a distintos voltajes, inicialmente calculados por modelos teóricos y que posteriormente se comprobaron experimentalmente. Así, partiendo de tres sodios por fórmula podemos a 3,4 V, oxidar el vanadio que está como vanadio 3+ a vanadio 4+, y extraer hasta dos sodios. Por último, a 4,64 V se extraería el último sodio. Contrariamente, partiendo de tres sodios podemos añadir uno a 2,03 V e incluso un segundo a voltaje es mucho más bajo, por lo que puede decirse que el material es utilizable tanto como cátodo o como ánodo de baterías de iones de sodio.

Por nuestra parte, hemos estudiado numerosos aspectos de este material, incluyendo las formas de síntesis para obtener partículas con morfologías que dieran comportamientos electroquímicos más favorables por mejorar el contacto con el electrolito (<https://doi.org/10.1021/acsami.6b07950>), las sustituciones vanadio por distintos metales que favorecen el aumento en el voltaje de trabajo, e incluso la sustitución del fosfato por grupos silicato parcialmente, lo que permite fabricar baterías de iones de sodio completas frente a carbón duro. Los sistemas resultantes de estos presentan densidades de energía de hasta  $340 \text{ W h kg}^{-1}$ , que es un valor bastante interesante para una batería de iones de sodio (<https://doi.org/10.1002/celc.201700933>). En cuanto a los ánodos para las baterías de iones de sodio, los carbones duros o no grafitizables son los que han dado los mejores resultados. A principios de este siglo, estudiamos por primera vez las posibilidades de los negros de carbón de almacenar sodio por vía electroquímica, y posteriormente lo extendimos a las mesosferas de mesocarbones. Más recientemente, hemos intentado abordar la utilización del propio grafito, mediante la cointercalación de disolventes como puede ser la diglima. Las moléculas de diglima se intercalan junto con el sodio entre las láminas de grafito, lo que permite que el grafito también pueda utilizarse como material activo de los ánodos de baterías de iones de sodio (<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814083-3.00013-5>).



## **MÁS ALLÁ DEL LITIO. METALES DI Y TRIVALENTES Y SISTEMAS DUALES**

Ejemplos de otras posibilidades con más electrones en juego incluyen a los metales alcalinotérreos más sostenibles (magnesio y calcio) y al aluminio. A su vez, todos ellos pueden combinarse en los sistemas denominados de catión dual o híbridos.

Las baterías de magnesio tienen una ventaja importante, ya que este metal no forma dendritas al ciclar, con lo cual podríamos pensar en utilizarlo como ánodo por sí mismo. El problema está en que es muy inestable en contacto con la mayor parte de los disolventes de los electrolitos que se utilizan para los cátodos. Por lo cual, en el intento de utilizar baterías con magnesio no puede descartarse tampoco una batería de iones de magnesio. En ella, sustituiríamos el magnesio metal por otro compuesto de magnesio, del cual se pudieran extraer los iones. Los compuestos que insertan y liberan el magnesio de forma reversible son muy numerosos. Desde las fases de Chevrel hasta otros que forman aleaciones como el propio estaño, o compuestos con reacciones de conversión o de desplazamiento en general (<https://doi.org/10.3390/batteries8090105>).

En nuestro caso, hemos abordado algunos de ellos, por ejemplo, la espinela de magnesio y manganeso, la cual es parecida a la espinela de litio y manganeso anteriormente mencionada, aunque en vez de tener litio, tiene magnesio y ese magnesio se puede extraer tanto por vía química como por vía electroquímica, dando capacidades interesantes a voltajes aceptables para actuar como cátodo. En cuanto a los ánodos, estudiamos las aleaciones de magnesio con estaño, las cuales, combinamos con los cátodos de espinela para dar lugar a celdas de iones de magnesio completas como que en principio tienen muy baja capacidad, pero que progresivamente van mejorando, especialmente, si se utilizan nanopartículas de estaño metal. También ha sido posible estudiar este sistema mediante espectroscopía Mössbauer (<https://doi.org/10.3390/nano8070501>).

En cuanto al calcio, este metal es más pesado, pero más reductor que el magnesio, por lo que podría proporcionar unas densidades de energía útiles para el almacenamiento. Lo que ocurre es que de nuevo hay que buscar compuestos de inserción que sean relativamente estables y todavía el conocimiento sobre estos compuestos es mucho más incipiente que para el magnesio, que a su vez es mucho más incipiente que para el sodio. En cualquier caso, hemos estudiado algún óxido de molibdeno como el trióxido, tanto desde el punto de vista de cálculos teóricos por métodos de DFT para la predicción de los voltajes como con la posterior comparación con resultados experimentales. Otro sistema, el óxido de calcio y cobalto, lo combinamos con el pentóxido de vanadio para formar un sistema de iones de calcio completo, el cual, presenta capacidades limitadas, pero que fue un primer ejemplo de sistemas de iones de calcio (<http://dx.doi.org/10.1016/j.elecom.2016.03.016>). En el caso del aluminio también hemos completado algún estudio sobre su intercalación en el pentóxido de vanadio.

Finalmente, puede mencionarse que en algunos sistemas recientemente abordados se pretende utilizar lo mejor de los iones de más de un elemento químico simultáneamente, construyendo unas baterías en las cuales se pongan en juego no solamente iones de un metal, sino de varios elementos electropositivos a la vez. Estas se pueden denominar baterías con catión dual o baterías híbridas, en las que ambos iones se trasladan por el

electrolito del cátodo al ánodo durante la carga, y del ánodo al cátodo durante la descarga. Para conseguirlo, podemos utilizar dos tipos de configuración. En primer lugar, baterías con ánodo metálico, similares a los sistemas de ánodo metálico sencillos antes aludidos, pero con dos tipos de iones presentes. En segundo lugar, con diseño tipo “mecedora” para los dos iones simultáneamente, pudiéndose intercalar en uno o en ambos electrodos a la vez, tanto en la carga como en la descarga. Son muchos los sistemas posibles y algunos se encuentran ya en la bibliografía. Así, pueden encontrarse estudios sobre diversas combinaciones entre iones como el protón, amonio, litio, sodio, potasio, magnesio, calcio, zinc y aluminio, y tanto en batería de mecedora como en baterías con ánodo metálico. Continuamente aparecen nuevas publicaciones al respecto, siendo previsible que esta metodología siga desarrollándose en el futuro (<https://doi.org/10.1007/s10008-020-04620-3>).

En nuestro caso, hemos estudiado el sistema de magnesio y sodio utilizando vanadato sódico como cátodo, magnesio en el electrolito y ánodo de magnesio metal. El vanadato tiene ya sodio en su estructura y lo libera al electrolito durante la carga a la vez que el que el magnesio se puede liberar durante la descarga, pudiéndose puede ciclar ambos iones. Igualmente, contemplamos los voltajes correspondientes y las estructuras, comparando cálculos teóricos por DFT con datos experimentales obtenidos. Por otro lado, en el caso del NVP probamos primero a extraerle el sodio y después insertarle sodio y magnesio progresivamente, dando lugar a reacciones consecutivas que permiten utilizar ambos iones en la disolución. Siguiendo con el NVP, tras la sustitución de parte de su vanadio por cromo, pudimos comprobar que la cointercalación de sodio y magnesio se da mucho más favorablemente a bajas temperaturas, lo cual lo hace un candidato interesante para baterías duales que trabajen en condiciones rigurosas de temperatura, por ejemplo, en climas gélidos, donde las baterías convencionales necesitarían gastar parte de la energía acumulada en subir la temperatura de trabajo. Similarmente, en colaboración con la Universidad de Xiamen (República Popular China), demostramos la posibilidad de utilizar los fluorofosfatos de sodio y vanadio en semiceldas de magnesio (<https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.03.035>). Mediante cálculos teóricos y estudios de resonancia magnética nuclear, demostramos la reducción del vanadio como resultado de la intercalación del magnesio. Para finalizar, solamente mencionar dos últimos ejemplos: una batería dual de magnesio y protón que utiliza un cátodo de silicato de magnesio y manganeso que hemos publicado recientemente, en el cual de nuevo combinando ambos iones, se pueden alcanzar capacidades bastante interesantes, y una batería dual de aluminio y sodio utilizando el NVP (<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.12.040>).

## **RESUMEN Y CONCLUSIONES**

Resumiendo todo lo anterior. Para luchar contra el cambio climático es imprescindible desarrollar sistemas de almacenamiento de energía eficientes y sostenibles. En la actualidad, existen numerosas posibilidades de almacenar la energía, pero no hay ninguna

que por sí misma pueda servir para cubrir todas las necesidades. Dentro de los sistemas electroquímicos, la batería de iones de litio ha sido hasta ahora el éxito más rotundo, pero actualmente su sostenibilidad está en entredicho y seguramente hay que buscar algunas alternativas. Posiblemente, los nuevos sistemas no sustituirán totalmente a las baterías de iones de litio, aunque las complementarán, por ejemplo, en aplicaciones de tipo estacionario, como pueden ser el almacenamiento de energías renovables intermitentes. Dentro de las nuevas alternativas, la batería de iones de sodio es probablemente la que está más próxima a ser una realidad extendida a gran escala industrial y existen numerosas empresas en distintos continentes actualmente implicadas en su desarrollo. Frente a las baterías de iones de litio o sodio, otras opciones, como magnesio, calcio, potasio o aluminio, están algo más lejos de una aplicación práctica real, pero están siendo también objeto de estudio bastante exhaustivo, tanto en sistemas sencillos como duales.



***CICLO INTERACADÉMICO SOBRE LA TABLA  
PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS***



# **ANDRÉS MANUEL DEL RÍO, Y EL ELEMENTO VIGÉSIMO TERCERO: PANCROM(I)O, ERITRON(I)O, ZIMAPANIO, RIONIO, ODINIO, ERIAN, SEFSTRÖMIUM O VANADI(N)O**

*Conferencia pronunciada por  
el Excmo. Sr. D. Agustín G. Asuero,  
dentro del ciclo interacadémico sobre  
la tabla periódica de los elementos químicos,  
el día 31 de octubre de 2019.*

## **RESUMEN**

En esta conferencia tras un preámbulo previo en el que se define el contexto en el que se desenvuelve el pensador D. Andrés Manuel del Río se pasa revista a su formación, descubrimiento del vanadio –elemento vigésimo tercero de la tabla periódica– y algunos aspectos relevantes de su vida y obra, en especial su entrada en la Academia de Ciencias de Francia.

Pretender abarcar una figura tan vasta como la de D. Andrés Manuel del Río en un corto espacio de tiempo es como pretender escanciar un océano en un vaso de agua. Andrés Manuel del Río produjo entre libros, artículos, folletos y notas más de 70 trabajos científicos repartidos en los idiomas español, francés, alemán e inglés. Esta presentación se trata tan solo de una aproximación al tema, que requiere para complementar, acudir a las fuentes bibliográficas que se citan.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Errante por el mundo fui gritando.  
“La gloria ¿dónde está?”  
Y una voz misteriosa contestóme:  
“Más allá...más allá...”  
*Gustavo Adolfo Bécquer (1836-1870)*

Se han vertido ríos de tinta sobre don Andrés Manuel del Río y Fernández (1764-1849) [Madrid-Ciudad de México] este ilustre e insigne personaje, descubridor del vanadio, madrileño de nacimiento y mexicano de adopción, que votó a favor de un México libre (Castillo Martos, 2021) en las Cortes de Cádiz durante el Trienio Liberal

(1820-1823). Es por lo que pudiera parecer en principio cuestionable la elección de esta materia como tema objeto de un discurso de entrada, dada la dificultad manifiesta de llevar a cabo algún tipo de nueva aportación. Patricia Aceves Pastrana (n.d.), farmacéutica mexicana, historiadora de la ciencia, realiza una semblanza muy completa de don Andrés Manuel del Río en la web de la Real Academia de la Historia de España. Ha publicado asimismo variados estudios sobre la enseñanza de la química en México en tiempos de Lavoisier (Aceves Pastrana, 1995; Aceves Pastrana, 1994; Aceves Pastrana, 1992; Aceves Pastrana, 1990), la renovación de la farmacia en la Nueva España a finales del período colonial (Aceves Pastrana, 2009; Aceves Pastrana, 2004) y sobre las ciencias vinculadas a la terapéutica (Aceves Pastrana, 1999). Es precisamente esa dificultad patente la que nos anima a la hora de hacer una inmersión en el tema apoyándonos de una parte en las fuentes primarias existentes, y aprovechando la ocasión, por otra, para ordenar y clasificar la bibliografía disponible sobre el particular, de forma tabular. Convencido como aprendí de pequeño por parte de mi madre, maestra nacional, de que la repetición es el alma de la enseñanza, y que ayuda a combatir el mal de la desmemoria (CONACYT, n.d.), esta tribuna ofrece sin duda una oportunidad para reafianzar la magistral obra de don Andrés Manuel del Río, y rendir al mismo tiempo honor en homenaje a su memoria.

El hecho de haber sido el 2019 el Año Internacional de la Tabla Periódica ha supuesto una ocasión para poner de manifiesto la importancia de los descubrimientos de los elementos químicos, y en particular, aquellos correspondientes a autores de habla hispana (Fernández García, 2019; González Vergara, 2019; Romero, 2019), no solo en trabajos científicos sino también a nivel de divulgación en la prensa y en la WEB, e.g. ciencia/arte/ diplomacia en “La Jornada” (Mateos Vega y Camacho, 2022), la conquista del pasado en “El Español” (Sánchez Ron 2022), el elemento químico mexicano en “El Herald de Juárez” (Martínez Gordillo, 2021), en el “Mexico News Daily” (Tenorio, 2021), en “De Reporteros” (Rodríguez, 2019) y en “El Universal” (Villa Román, 2019), resaltando Pinto Cañón (2020) en “Naukas” el carácter polifacético de Del Río y De Cora (2019) la “triacastela” en “El Progreso de Lugo”. En estos medios se ha venido reflejando también en los últimos años la importancia de la demanda del vanadio en el mercado (Argus Media, 2020), su potencial de cara al cambio de las energías renovables (Tele Mundo, 2021); o su consideración como el nuevo oro verde (Yanes, 2021).

Andrés Manuel del Río posee una dimensión universal, mereciendo un puesto de honor en el “Dictionary of Scientific Biography” (Holser, 1975), lo que no ocurre, curiosamente con Sefström, el redescubridor del vanadio. Azuela y Guevara Feder (1998) han realizado una aproximación historiográfica a la ciencia mexicana en el siglo XIX, en la que ocupa del Río por derecho propio un lugar de privilegio (Prieto, 1965; Uribe Salas, 2018; Uribe Salas, 2013). Las reformas educacionales que promovieron la química en ingeniería, medicina y agricultura en las ciencias en México durante los siglos XVIII y XIX han sido objeto de atención por Cárdenas Mendes y Ramos Sera (2002). Heliodoro Valle (1954) pasa revista a los químicos mexicanos, prestando atención a del Río. Chamizo (2004) perfila la historia de la química en América latina sobre la base de tres fases históricas: prehispánica, independiente y actual. Matharan (2016) atiende a la



consolidación de la química como disciplina en Argentina, México y Colombia, rindiendo homenaje Merino et al. (2021), recientemente, al talento Latinoamericano en química. Polo Conde y López Cancio (1987) pasan revista a los saberes químicos en España desde el siglo XVI al XX y Portela y Soler (1992) a la química española del siglo XIX.

Diversos autores indistintamente se disputan la nacionalidad de Andrés Manuel del Río y por ende la pertenencia del descubrimiento, a una u otra nación: México o España. Del Río, el sabio errante que eligió México como patria, es por encima de toda reivindicación, un ciudadano del mundo, un patrimonio reconocido como universal, si atendemos a su trayectoria vivida, extenso legado y ejemplo a imitar. Aspectos relacionados con los científicos europeos del siglo XIX en México (Barberena Blazquez, 1986) han sido objeto de estudio, así como el binomio ciencia e independencia en Latino América (Glick, 1991). La Ilustración española en relación con el pragmatismo americano (Gutiérrez, 2008), la ideología en la ilustración española (Morales Moya, 1988), la ciencia en la Ilustración mexicana (Moreno, 1975), así como apuntes para el estudio de la presencia de la Ilustración alemana en México (Torales Pacheco, 2003) han sido puestos de manifiesto. Hay que destacar también otros personajes de su entorno entre los que podemos mencionar Leopoldo Río de la Loza (Garriz, 2010), José Mariano (Martínez, 2008); Antonio del Castillo y José Aguilera (Uribe Salas 2006).

La aportación principal de este discurso de entrada quizás sea, la documentación aportada (Académie des Sciences, 1842) sobre la incorporación de don Andrés Manuel del Río como académico correspondiente a la Academia de Ciencias de París, ocupando por tanto lo que puede expresarse como “un lugar en el Reino”, y eso fue así, frente a otros actores principales que rivalizaron en la contienda por dicho puesto, entre ellos, Nils Gabriel Sefström (1787-1845) redescubridor del vanadio, presidente de la Real Academia de Ciencias de Suecia los años 1840 y 1841, y discípulo del afamado Jöns Jacob Berzelius (1779-1848). Hay que imaginar a Andrés Manuel del Río dichoso por este gran último logro, lejos de ese halo de desventura con el que algunos se esfuerzan en envolver a este sin par gran personaje. Uribe-Salas (2007, 2013, 2006) ha estudiado a Andrés Manuel del Río a fondo en todos sus contextos, incluyendo las facetas de ciencia y filosofía (Uribe Salas, 2018) y de intercambio e innovación tecnológica (Uribe Salas, 2015), resaltando aspectos de intencionalidad y destino en la historia de la ciencia (Uribe Salas, 2021).

El ritmo de los sucesos acontecidos a lo largo de su vida y la riqueza de matices consiguiente, desde su formación en Europa hasta la constitución de México como estado independiente, hacen que este personaje haya sido objeto de gran atención e interés.

## **2. LOS ELEMENTOS QUÍMICOS EN LOS TIEMPOS DE ANDRÉS MANUEL DEL RÍO**

El lenguaje de la química posee un alfabeto propio (Trifonov y Trifonov, 1990; Carmona Guzman, 2010; Poliakov y Tang, 2015; Wang y Schwarz, 2009). Los elementos químicos son los símbolos de estas letras que representan la amplia diversidad de los

compuestos químicos existentes (Pellón González, 2014; Elguero, 2007). Aquellos que conforman la naturaleza viva y el reino mineral son variadas combinaciones de algo más de ochenta. El resto, prácticamente no existe en el mundo que nos rodea y tienen un carácter artificial. Como indica Henri Moissan (1852-1907), farmacéutico, premio nobel de Química en 1906, en el prólogo de su libro sobre el flúor y sus compuestos: “La recherche d’un nouveau corps simple est toujours très captivante (Moissan, 1900, p. viii).

En esa andadura se ve envuelto Andrés Manuel del Río, descubridor del elemento con número atómico  $Z = 23$ , hoy reconocido como vanadio, en un mineral mexicano, con las limitaciones de la época y lugar; al no circular los intercambios científicos y técnicos con la misma fluidez y velocidad que en Europa. En una fecha (Greenwood, 2003) anterior a la teoría atómica de John Dalton (1803-1808) y a la tabla periódica (1869) de Dimitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907) y más de un siglo previa a los números atómicos (1913) de Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915), los posibles puntos de referencia para los científicos eran entonces bastante limitados (Fontani et al., 2014).

La existencia de los elementos carbono, azufre, hierro, cobre, zinc, arsénico, plata, estaño, antimonio, oro, mercurio, plomo, bismuto data de tiempos prehistóricos. Los siete metales conocidos por los alquimistas (Brock, 1998; Lemery, 2002; Roth, 1978) se muestran en la Tabla 1, así como sus asociaciones con los planetas, órganos vitales y días de la semana. Las primeras cátedras de química (Klein, 2004) se crean en las facultades de medicina (Alemania) y jardines botánicos –e.g. Jardín de Plantas (Scalberge, 1636) en París– a lo largo del siglo XVII; y se adopta como materia oficial (Martin et al., 2018; Sáez Plaza et al. 2019), en la Real Academia de Ciencias de Francia en 1699.

La palabra «apothicaire» o «boticario» se contempla en los Reglamentos sobre las Artes y Oficios de París (Lespinnasse y Bonnardt, 1879), redactados el siglo XIII, conocidos bajo el nombre de Libro de los Oficios de Etienne Boileau (1200-1270). La separación legal entre Medicina y Farmacia se produjo por primera vez en la Europa Occidental cristiana en 1240, en el Reino de las Dos Sicilias. La Farmacia fue distinguida por Felipe IV (1605-1655) como arte científica (Asuero, 2009; Asuero, 2015; Asuero, 2011) igual a la Medicina, y el Real Colegio de Boticarios de Madrid, destinado al “cultivo y adelantamiento de la Farmacia, Química, Botánica e Historia Natural”, fue creado por Pragmática de Felipe V (1700-1746) en 1737, dando origen en 1804 a la Facultad de Farmacia de Madrid.

En México, los estudios profesionales de farmacia comenzaron a impartirse (Vega y Ortega y Daniel Serrano, 2013) de forma escolarizada en el establecimiento de Ciencias Médicas (antiguo Hospital de Betlemitas), 1833, órgano sustituto de la Facultad de Medicina de la Universidad Pontificia, hoy Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La primera cátedra de Farmacia estuvo a cargo del profesor José María Vargas (1778-1875), que la ocupó hasta su muerte. Desde que el estudio de la química se instituyó en la Nueva España, fue una disciplina asociada al ejercicio profesional de los mineros, aunque rápidamente se vincularía al quehacer de médicos y farmacéuticos. Hasta 1843, el Seminario Nacional de Minería fue el lugar al que acudieron los aspirantes al colegio médico (Morales-Cosme y Viesca-Treviño, 2016).

Lavoisier (1789) identificó más de 20 elementos químicos y clasificó en metales, no metales, metales de transición y metaloides; en 1789 publicó una lista de 33 elementos (Aceves Pastrana, 1990). Los siglos XVIII y XIX asistieron al descubrimiento de una multitud de nuevos elementos, y a un considerable progreso tanto de la mineralogía como de la geología. Francisco Carbonell y Bravo (1768-1836) en sus “Elementos de Farmacia fundado en los principios de la Química moderna” apunta (Carbonell y Bravo, 1802): “Esta Ciencia (la Farmacia), tan venerable por su antigüedad, tan útil por su influxo en el cultivo de otras muchas (pero aún más apreciable por haber sido cuna y nutrimento de la Chímica)...”. Hermann Kopp, químico y gran historiador de la química, no repara en considerar la farmacia (Urdang, 1948) madre de la química en toda regla.

**TABLA 1**  
**ELEMENTOS CONOCIDOS POR LOS ALQUIMISTAS**

METAL	PLANETA	ÓRGANO	DÍA
Oro	Sol	Corazón	Domingo
Plata	Luna	Cabeza	Lunes
Hierro	Marte	Hígado	Martes
Mercurio	Mercurio	(*)	Miércoles
Estaño	Júpiter	Pulmones	Jueves
Cobre	Venus	Riñones	Viernes
Plomo	Saturno	Bazo	Sábado

(\*) Asociado con el alma

Para Ursula Klein (1952-), alemana, del Instituto Max Planck de Historia de la Ciencia (Berlín) “la conexión entre la farmacia y la química procede de los tiempos medievales” (Klein, 2004). En el siglo XVIII el boticario dedicado a la química es un personaje ampliamente respetado. Durante el siglo XIX, en el entorno social, la química y su “alter ego” la farmacia, han contribuido (Blondel-Mégrelis, 2006; Klein, 2007; Puerto Sarmiento, 2008; Simon, 2014) a la solución de problemas legales, mejora de procedimientos de carácter industrial, vigilancia y garantía de la salud e higiene pública, verificación de los alimentos, detección del fraude, evaluación de la polución medioambiental, y detección de enfermedades profesionales.

El escenario cuando Andrés Manuel del Río emprende sus investigaciones sobre un nuevo metal se muestra en la Tabla 2. Siete de los diecinueve elementos que aparecen en ella (Weeks, 1956) fueron descubiertos por farmacéuticos. La primera parte del siglo XIX fue pródiga en descubrimientos sobre productos inorgánicos, bajo la dirección de una serie de notables químicos y mineralogistas suecos y finlandeses (Asuero, 2022), que trabajaron sobre las muestras de minerales raros encontrados en Suecia. En 1818 se conocían 49 elementos, en 1830 la lista llegaba ya a 53, y en 1869 a 63. En 1880 no menos de una veintena de los elementos químicos naturales habían sido aislados en Suecia

TABLA 2. ELEMENTOS QUÍMICOS DESCUBIERTOS (SIGLOS XVII Y XVIII)

AÑO	ELEMENTO		DESCUBRIDOR	PAÍS
1669	Fósforo	P	Henning Brandt (1630-1710) (*)	Alemania
1748	Platino	Pt	Antonio de Ulloa y de la Torre-Guirard (1716-1795)	España
1751	Níquel	Ni	Alex Fredrik Cronstedt (1722-1765)	Suecia
1766	Hidrógeno	H	Henry Cavendish (1731-1810)	Reino Unido
1772	Nitrógeno	N	Daniel Rutheford (1749-1819)	Reino Unido
1774	Cloro	Cl	Karl Wilhelm Scheele (1742-1786) (*)	Suecia
1774	Manganeso	Mn	Johan Gottlieb Gahn (1745-1818)	Suecia
1774	Oxígeno	O	Joseph Priestley (1733-1804)	Reino Unido
1781	Molibdeno	Mo	Peter Jacob Hjelm (1746-1813)	Suecia
1782	Teluro	Te	Joseph Müller von Reichenstein (1740-1825)	Hungría
1783	Wolframio	W	Fausto d'Elhuyart (1755-1833) y Juan José d'Elhuyart (1754-1796)	España
1789	Uranio	U	Martin Heinrich Klaproth (1743-1817) (*)	Alemania
1789	Zirconio	Zr	Martin Heinrich Klaproth (1743-1817) (*)	Alemania
1791	Titanio	Ti	William Gregor (1761-1817)	Reino Unido
1794	Ytrio	Y	Johan Gadolin (1760-1852)	Finlandia
1797	Cromo	Cr	Louis Nicolas Vauquelin (1763-1829) (*)	Francia
1798	Berilio	Be	Louis Nicolas Vauquelin (1763-1829) (*)	Francia
1798	Estroncio	Sr	Martin Heinrich Klaproth (1743-1817) (*)	Alemania

(\*) Farmacéuticos

De los veintinueve elementos descubiertos en la primera mitad del siglo XIX (del Río fallece en 1849), cinco de ellos también fueron descubiertos por farmacéuticos. El cerio en 1803 por Klaproth, asistente farmacéutico del Ober-Collegium médico en Berlín y más tarde profesor de su universidad, defensor de la nueva química de Lavoisier. El iodo en 1811 por Bernard Courtois (1777-1838), salitrero, en las cenizas de las algas pardas (Sáez Plaza et al., 2017b). El cadmio en 1817 por Friedrich Stromeyer (1776-1835), en una muestra de carbonato de zinc (calamina), coloreada de amarillo, que casualmente observó en una visita a una botica (Sáez Plaza et al., 2018), ya que era inspector general de farmacia de Hannover (cadmio viene del latín *cadmia*, que significa calamina). El aluminio en 1825 por Hans Christian Oersted (1777-1851), que lo aisló por reducción del  $AlCl_3$  anhidro con amalgama de K y evaporación por calentamiento del Hg (Trífonov y Trífonov, 1990). El bromo en 1825 por Antoine-Jerome Balard (1802-1876), estudiante de farmacia, preparador de la Facultad de Ciencias de Montpellier, a los 23 años, en las aguas madres de las salmueras de marismas (Sáez Plaza et al., 2017c). Oersted, hijo mayor de un boticario, asistente en la farmacia del padre donde adquirió un conocimiento práctico de los fundamentos de la química (Pearce Williams, 1974) se graduó en farmacia con honores en 1797; su figura va ligada al electromagnetismo.

### 3. UN PRIMER SOBRE EL VANADIO

“Input to vanadium chemistry started with the element’s discovery by del Rio in 1801, and its rediscovery by Sefström in 1830”  
(Rehder, 2013, p. 11759)

El vanadio es el elemento vigésimo segundo en abundancia en la corteza terrestre (0,013 % w/w), superando al cobre y al cinc. El isótopo  $^{51}\text{V}$  da cuenta del 99,76% de su presencia natural correspondiendo el 0,24 % restante al  $^{50}\text{V}$  (ligeramente radiactivo con vida media  $> 3,9 \times 10^{17}$  años) (Ligtenberg, 2001). Se conocen hasta 24 isótopos del vanadio (Shore et al., 2010). Tras el molibdeno, el vanadio es el segundo elemento de transición más importante en el medio marino. Algunos organismos acuáticos acumulan vanadio. Las menas de las que se extrae el metal son la carnotita  $\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2$ , la vanadinita  $\text{Pb}(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$ , la patronita  $\text{VS}_4$  y la cechita  $\text{PbFeVO}_4(\text{OH})$ . Las fuentes más importantes de vanadio se encuentran en Estados Unidos (depósitos de carnotita de Colorado y Utah), Canadá (depósito Ivana en Rio Negro), China (suroeste de Sichuan), Sudáfrica (empresas Bushveld Minerals y Glencore), República Checa (mina Alexander y afloramiento de Posepny), Brasil (Maracás Menchen, la mina con el vanadio más puro del mundo) y Perú (depósitos de patronita, e.g. Minas Raga) (Marks, 1929).

El potencial catalítico de los óxidos de vanadio y sus compuestos se ha explotado desde 1890. El uso del  $\text{V}_2\text{O}_5$  en el proceso de fabricación del ácido sulfúrico por el método del contacto es bien conocido. Las aleaciones (aceros) de vanadio con hierro y titanio son de una extraordinaria dureza por lo que se usan en la fabricación de herramientas, construcción de edificios elevados y pesados, fabricación de turbinas para aviones y en la industria automotriz (Vilar, 2003). Ford utilizó dicho acero en la fabricación del afamado modelo T. La aleación con el titanio se utiliza para fabricar cápsulas submarinas capaces de resistir las presiones generadas a profundidades de hasta 10.000 m. Al ser de baja densidad y gran dureza encuentran uso en la fabricación de aviones.

El potencial biológico del vanadio se documenta en 1888 (remolacha azucarera) y 1911 (ascidia). El descubrimiento de enzimas dependientes de vanadio y por ende la esencialidad del vanadio en variadas formas de vida data de 1933 (nitrogenasas) y 1983 (haloperoxidasas) y marca un punto de inflexión en el desarrollo de la química del vanadio biológicamente orientada. El anuncio por Cantley en 1977 del antagonismo fosfato-vanadato se convirtió en el punto de partida para una carrera hacia la química del vanadio de orientación medicinal, incluida su toxicología (Rehder, 2020a; Rehder, 2020b; Rehder, 2013). Se han realizado ensayos clínicos para evaluar el potencial de los complejos de maltolato de  $\text{VO}^{2+}$  en el tratamiento de la diabetes, dada su capacidad de “imitar” algunas de las funciones de la insulina, hormona encargada de regular el metabolismo. Aspectos de la química, bioquímica, bioinorgánica e industriales del vanadio y sus compuestos (Tabla 3), aplicaciones biológicas, farmacéuticas y farmacológicas (Tabla 4) y aspectos medioambientales y toxicológicos (Tabla 5) han sido repetidamente puestos de manifiesto, en mayor grado, de manera reciente.

**TABLA 3**  
**ASPECTOS DE LA QUÍMICA, BIOQUÍMICA, BIOINORGÁNICA E INDUSTRIALES DEL VANADIO Y SUS COMPUESTOS**

AÑO	COMENTARIO	AUTOR/ES
2020	Vanadio: desde el descubrimiento al papel en la vida	Sánchez Lara
2019	Química, presencia y aplicaciones	Bowell
2019	Aplicaciones catalíticas	Langreslau et al.
2019	Baterías de flujo redox	Lourensen et al.
2019	Evolución y comprensión de los elementos del bloque d de la tabla periódica	Constable
2013	Futuro del vanadio	Rehder
2012	Química orgánica medicinal	Aguilar Cuevas et al.
2010	Isótopos del vanadio	Shore et al.
2007	Vanadio el metal versátil	Kustin et al.
2008	Química bioinorgánica del vanadio	Rehder
2004	Química, bioquímica y actividades biológicas	Crans et al.
2004	Datos técnicos, historia, procesado, aplicaciones	Enghag
2003	Vanadio: algunas aplicaciones	Vitar
2001	Complejos de vanadio y hierro en catálisis oxidativa	Listenbarg
1996	Química bioinorgánica: semblanza	Guevara García
1974	Vanadio en el mundo vivo	Senozan
1973	Química del vanadio, niobio y tántalo	Clark
1968	Estados de oxidación	Davis
1951	Preparación del vanadio metal	Long
1911	Peso atómico	Hinrichs
1891	Vanadio, niobio, tántalo, molibdeno y wolframio: historia	Jagnaux
1868	Investigaciones sobre el vanadio I, II y III	Roscoe

El vanadio se acumula en las tuberías de plomo; la vanadinita insoluble se moviliza por el exceso de fosfato en el caso de acidificación, por lo que el vanadio está presente como  $\text{H}_2\text{VO}_4^-$  en las aguas subterráneas y potables, lo que requiere seguimiento, dado que un exceso puede ser tóxico (Rehder, 2013). Materiales basados en óxidos de vanadio y vanadatos juegan un papel creciente como cátodos en baterías de litio de alta densidad. El almacenamiento de energía es un campo adicional atractivo y comparativamente reciente para la aplicación de los óxidos de vanadio (Taroni, 2017). Los materiales nanoscópicos de pentóxido de vanadio (incluyendo los nanocables, nanovarillas y materiales nanoporosos) constituyen futuras aplicaciones de alto impacto en los ámbitos de aplicaciones catalíticas, baterías redox de vanadio (empleando los pares  $\text{V}^{\text{V}}/\text{V}^{\text{IV}}$  y  $\text{V}^{\text{III}}/\text{V}^{\text{II}}$ ) y baterías de óxido de vanadio de litio/plata (Rehder, 2008).

**TABLA 4**  
**APLICACIONES BIOLÓGICAS, FARMACÉUTICAS, FARMACOLÓGICAS Y MÉDICAS DEL**  
**VANADIO Y SUS COMPUESTOS**

AÑO	COMENTARIO	AUTOR
2022	Tendencias en química, bioquímica y química médica	Gambino
2021	Complejos vanadio-flavonoides e implicaciones terapéuticas prometedoras	Selvaraj y Krishman
2020	Aplicaciones medicinales del vanadio y de sus compuestos de coordinación en la investigación actual	Prasad y Ramachandrapa
2019	Aspectos químicos, farmacológicos, e implicaciones metabólicas en diabetes mellitus	Treviño et al.
2020-2018	Complejos metálicos en medicina y farmacia	Habala y Valentova
2018	Beneficios para la salud y uso potencial anticancerígeno	Crans et al.
2017	Implicaciones del vanadio en aplicaciones técnicas y farmacéuticas	Rehder
2015	Compuestos de vanadio en medicina	Pessoa et al.
2015	Papel en biología	Rehder
2013	Papel en humanos	Rehder
2012	Importancia bioquímica y médica de los compuestos de vanadio	Korbechi et al.,
2012	Potencial en aplicaciones médicas	Rehder
2011	Elemento traza esencial y agente terapéutico	Gummov
2010	Uso potencial en terapéutica	Barrio y Etcheverry

**TABLA 5**  
**ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES Y TOXICOLÓGICOS DEL VANADIO**  
**Y SUS COMPUESTOS**

AÑO	COMENTARIO	AUTOR/ES
2022	Geología económica, énfasis en el mercado y tipos principales de depósito	Simandi y Paradis
2021	Efectos beneficiosos y detrimentales en humanos y plantas terrestres	Hanus-Fajerska et al.
2020	Aspectos biológicos, medioambientales e ingenieriles	Rehder
2019	Geoquímica del vanadio en la biosfera, especiación, interacciones sólido-sólido y ecotoxicidad	Gustafsson
2018	Vanadio, un peligroso contaminante re-emergente	Watt et al.
2017	Contaminación ambiental y riesgos de salud en ecosistemas marinos	Supe Tulcan et al.
2014	Exposición ambiental y ocupacional y efectos sobre la salud	Fortoul et al.
2011	Efectos de contaminación ambiental y sobre la salud	Gummov
2006	Contaminación, metabolismo y genotoxicidad	Rodríguez Mercado y Altamiro Lozano

#### **4. LA FORMACIÓN DE MANUEL ANDRÉS DEL RÍO: EL SABIO ERRANTE**

Andrés Manuel del Río y Fernández viene al mundo en la calle del Ave María de Madrid en 1764, siendo bautizado en la parroquia de San Sebastián (calle Atocha, cerca de Santa Ana). Realiza sus estudios básicos en el Colegio de San Isidro y los continúa, pensionado por el Gobierno, en la Universidad de Alcalá de Henares, de notoria reputación. Su aprovechamiento le facilita el acceso a proseguir su formación profesional en la Academia de Minas de Almadén, llevando a cabo un posterior itinerario por prestigiosas instituciones científicas de Francia, Sajonia, Hungría e Inglaterra, con carácter previo a su nombramiento como profesor del Real Seminario de Minería de México, donde recalca tras arribar al puerto de Vera Cruz, en 1794, a la edad de 30 años.

Había estudiado por espacio de doce años (Tabla 6) , entre 1782 y 1794 en prestigiosas instituciones europeas, como la Real Academia de Minas de Almadén (1782-1783), la Escuela Real de Minas (1785-1786) y el Colegio de Francia (1786) en París, donde Jean d'Arcet (1724-1801), director de la Manufactura Nacional de Sévres había sido nombrado profesor de Química, la Escuela de Minas de Schemnitz de Hungría, recibiendo desde enero las enseñanzas de Anton Leopold Ruprecht von Eggenberg (1748-1814), profesor de química mineralogía y metalurgia (Pelayo y Rebok, 2004), la Bergakademie de Freiberg (1787-1789) en Alemania, donde impartían las clases Abraham Gottlob Werner (1750-1817), profesor de Mineralogía y Geognosia, Rechter en Geometría Subterránea, Christlieb Ehregott Gellert (1713-1795) en Metalurgia, química y técnicas de prospección, y el Laboratorio del Arsenal (1793-1794) entre otras. Ese peregrinaje lo hace entrar en contacto con los hombres de ciencia de más renombre.

Tras el período de aprendizaje en Schemnitz completa su adiestramiento, visitando los centros mineros europeos más importantes: baja y alta Hungría, Transilvania (salinas), Estiria y Carintia (fábricas de hierro y acero), Idria (azogue), Bleiberg (minas de plomo), Tirol (cobre), Salzburgo (minas y salinas), Gutewaser en Bohemia, Hannover, palatinado del Rin (minas de azogue), Lieja, e Inglaterra para informarse de los trabajos de las minas de carbón y sobre las fundiciones de hierro (Pelayo y Rebok, 2004, pp 93-94).

El imperio austriaco fue de los primeros en establecer cursos de instrucción en ciencias relacionadas con el beneficio de las explotaciones mineras y la fundición de minerales. La Academia de Minas de Schemnitz (actual Banská Štiavnica, Slovakia), fue fundada en 1763, durante el reinado de la Emperatriz María Teresa I de Austria (1717-1780), habiéndose impartido incluso antes enseñanzas al personal encargado de la superintendencia de trabajos relacionados con la extracción de la sal, minas, minas de carbón y hornos de fundición, pertenecientes a la corona de Austria. El centro estaba bien dotado y equipado con un laboratorio y con todas las facilidades para el ensayo y la fundición (Mining Academies, 1870).

Existían también academias mineras en Koben en Styria (Estiria, Austria), y en Pibram (Příbram) en Croacia. Estos establecimientos estaban soportados por el estado y las enseñanzas duraban cuatro años destinándose el último de ellos al aprendizaje práctico. En Schemnitz (Banská Štiavnica) se había extraído plata desde la Alta Edad



**TABLA 6**  
**CRONOLOGÍA DE LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES CIENTÍFICAS DE**  
**ANDRÉS MANUEL DEL RÍO (SALAS, 2007)**

1782	Ingresa en la Real Academia de Minas de Almadén (España)
1785	Estudia en l'École Royale des Mines y en el Collège de France (París)
1788	Se incorpora a la Bergakademie de Freiberg (Sajonia)
1789	Se inscribe en la Real Academia de Minas y Bosques (Hungría)
1791	Visita el Laboratorio del Arsenal (París)
1793	Recorre Escocia y Cornwall (Inglaterra) en donde se adiestra en el método de fundición de hierro
1795	Llega a Nueva España
1795	Inaugura la 1ª cátedra de mineralogía en el Real Seminario de Minería
1798	Imparte las cátedras de docimasia y ensayos
1801	Descubre el elemento químico vanadio con el nombre de eritronio
1803	Recibe en el Real Seminario de Minería a Alejandro de Humboldt
1805	Diseña, construye y opera la ferretería de Coalcomán, primera unidad industrial de su tipo en la América española
1812	Realiza una estancia en la Audiencia de Guatemala invitado por una sociedad científica
1820	Es electo como diputado de las Cortes de Cádiz
1829 a 1835	Inicia un exilio voluntario en Filadelfia, Estados Unidos, en donde realiza y publica parte de su obra científica

Media, y fue el lugar donde, en 1275, se utilizó por primera vez en el mundo (Kuzvart y Böhmer, 1986, p. 11) el emblema de los mineros y geólogos -martillos cruzados (o, más correctamente, martillo y cincel). En 1627 se realizó en Schemnitz la primera voladura con pólvora en galerías de conducción en minas. Y en 1875, también por vez primera, se alcanzó una profundidad de 1000 m en minería profunda en el yacimiento de plata de Pribam.

La Academia de Minas de Freiberg (Friburgo, Sajonia, Alemania) se creó en 1766, para estudiar la naturaleza y estructura mineralizada del planeta (Uribe Salas y Cortes Zavala, 2006), contribuyendo a la organización, institucionalización y profesionalización de las ciencias geológicas o Ciencias de la Tierra. Sus fundadores y benefactores fueron Friedrich Anton von Heynitz (1725-1802), posteriormente Ministro de Prusia, y Friedrich Wilhelm von Opperl (1720-1769), presidente del Departamento de Minas. La oficina central de la minería (Oberbergamt) en Freiberg, estaba bajo control del secretario del Tesoro, aglutinaba a una junta de directores de las minas en Sajonia (Oberbergräthe) y le correspondía además de la superintendencia de todos los asuntos mineros en Sajonia, la dirección de la academia. El presidente de esa junta (Oberberghauptmann) era al mismo tiempo el director principal de la academia (Mining Academies, 1870, p. 314).

A estas instituciones, e.g. la Escuela de Minas de Friburgo, acudían alumnos de Inglaterra, Francia, España y otros países de Europa. Allí estudiaron los hermanos Fausto (1755-1833) y Juan José Delhuyart y Lubice (1754-1796) y Andrés Manuel del Río (1769-1849), entre otros muchos. El gobierno español estaba interesado (Uribe Salas, 2006) en la formación de funcionarios mineros cualificados en las artes de los metales, con objeto de impulsar la investigación sobre los recursos mineros y minerales y promover en los reales de minas del virreinato las innovaciones tecnológicas necesarias para asegurar la buena marcha de las explotaciones mineras y las finanzas del reino. Del Río coincidió allí con Friedrich Wilhelm Heinrich Alexander von Humboldt (1767-1859).

## **5. MÉXICO COMO TIERRA DE LLEGADA (LA MINERALOGÍA TIENE LA RESPUESTA)**

La Corona (el Rey Carlos III) ideó un vasto plan para enviar técnicos y expertos formados en la Escuela de Minas de Friburgo para promover la minería en la Nueva España. Por Real Cédula de 1 julio de 1776 (hecha pública en 1783) se ordenó la creación en México de un Real Tribunal de la Minería. Fausto de Elhuyart, el primer director del Real Seminario de Minería (Arnaiz y Freg, 1939; Caswell, 1999; Fernández Bravo, 2008; Pinto Cañon, 2022; Weeks, 1956), ofreció a Del Río un puesto en la institución. Del Río llegó al puerto de Veracruz tras casi tres meses de viaje a bordo del navío de guerra “San Pedro de Alcántara” el 20 de octubre de 1794. En la Tabla 7 se muestran trabajos de interés relacionados con la minera y escuela de minas en México.

Don Andrés Manuel del Río muy bien pudiera decir con el poeta Juan Ramón Jiménez (1881-1958) en Dios deseante y deseado: “He llegado a una tierra de llegada”, y con Roberto Sosa (1930-2011), poeta centroamericano (hondureño): “Quien anudó los lazos del amor dispuso sus espinas”, pero también aquello con Vicente Pío Marcelino Cirilo Aleixandre (1898-1984) en los “Poemas de la Consumación”: Felicidad no engaña.

Como profesor titular de la cátedra de mineralogía (que inauguró en 1795) en el Real Seminario de Minería, posterior Colegio de Minería, formó en sus aulas a un importante elenco de profesionales (primero como facultativos y después como ingenieros de minas), e.g. José María Bustamante, Manuel Ruiz de Tejada, Ignacio Alcocer, Sebastián Segura, Joaquín Velázquez de León, Lucas Alamán, Blas Valcárcel, Antonio del Castillo, que contribuirían al desarrollo y consolidación de la mineralogía y de la geología mexicana en la segunda mitad del siglo XIX (Uribe Salas, 2007; Uribe Salas, 2018; Uribe Salas y Cortés Zabala, 2006; Uribe Salas y Zabala, 2014). Del Río compaginó la docencia con sus trabajos de investigación y con la traducción de manuales y tratados sobre orictognosia, geognosia, geometría subterránea y geología. Regentó la cátedra hasta su exilio voluntario en 1829 a los EEUU por un período de seis años, su época más productiva, retornando después al Colegio de Minería pese a su avanzada edad, 70 años.

**TABLA 7**  
**TRABAJOS SOBRE LA MINERÍA Y ESCUELA DE MINAS**

AÑO	COMENTARIO	AUTOR/ES
2022	Los primeros años de la Sociedad Geológica mexicana	Morelos Rodríguez
2020	Werner en el Nuevo Mundo a través de la enseñanza de Andrés Manuel del Río en su Cátedra de Mineralogía de la Escuela de Minas de México	Escamilla-González
2017	Escuelas de Minas en México y el 225 Aniversario del Real Seminario de Minería	Escamilla-González
2014	Tres protagonistas de la constitución del objetivo geológico en México	Uribe Salas
2013	De la Física en el Colegio de Minería al Instituto de Física de la UNAM	Domínguez Martínez
2013	De la consolidación de la mineralogía al despegue de la geología: promoción del conocimiento	Uribe Salas
2013	Ciencias de la Tierra en México (1846-1906) tras Manuel Andrés del Río	Valdivia Moreno
2012	Formación de ingenieros e intercambio científico técnico previo, durante y posterior a la independencia	Ramos Lara
2009	Sector minero y transmisión de conocimientos entre Europa y Nueva España	García Bravo
2009	Orígenes de la industria siderúrgica mexicana	Sánchez Díaz
2008	Bombas hidráulicas de del Río y d'Eluyart para el desagüe de las minas	Fernández Bravo
2007	Formación científica y desempeño académico de "del Río" en el Real Seminario de Minería	Uribe Salas
2006	Andrés Manuel del Río innovador tecnológico en minas y ferrerías	Uribe Salas
2000	El Colegio de Minería: minería, educación y sociedad	Flores Clair
1985	Influencia de España en el desarrollo de la metalurgia en Hispanoamérica	López González
1985	La minería colonial bajo la dominación española	Pérez Sáenz de Urturi
1984	Ordenanzas de la minería en Nueva España	González Domínguez
1955	Monografía sobre la mineralogía y la metalurgia en la América Española durante la época colonial	Bargalló
1892	Centenario del Colegio de Minería	Aguilar y Santillán
1890	Datos para la historia del Colegio de Minería	Ramírez
1783	Dirección, régimen y gobierno del Cuerpo de Minería en Nueva España y de su Tribunal General	Reales Ordenanzas

## **6. EL DESCUBRIMIENTO DEL VANADIO: UNA OBRA DE ARTE DE LA QUÍMICA ANALÍTICA**

La química es la ciencia de la materia y de sus transformaciones (Asuero, 2019), y juega un papel primordial en la comprensión de los fenómenos materiales, y de la vida. Pone a nuestra disposición sustancias necesarias para asegurar el sustento, mejorar las condiciones de vida y curar las enfermedades. El lenguaje de la química tiene una gran belleza estética y sirve de puente con las ciencias físicas y biológicas. “La química nos resuelve los secretos de la terapia, de la fisiología y de la patología (Paracelso); sin la química estamos deambulando en la oscuridad”. Para Guillaume François Rouelle (1718-1779), el Viejo, maestro boticario: “Se distingue mal a propósito de la farmacia en Galénica y Química. Sin esta última, la primera no hace más que combinaciones a la aventura y mezclas que lejos de conseguir el fin que se propone, son a menudo funestas...”

Para Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794): “La química somete a experiencias los diversos compuestos de la naturaleza, con objeto de descomponerlos y examinar separadamente las diferentes sustancias que los forman”. Gracias a Lavoisier, Joseph-Louis Gay Lussac (1778-1850), Louis Jacques Thenard (1777-1857) y Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) la Química fundamenta en el análisis el conocimiento de los cuerpos sometidos a estudio. Asimismo, la química orgánica se encauza a fines del siglo XIX, una vez que Justus von Liebig (1803-1873) en Alemania y Jean-Baptiste-André Dumas (1800-1884) en Francia, establecen los principios del análisis orgánico. La química, con Marcellin Pierre Eugène Berthelot (1827-1907), es también la ciencia de la síntesis. Toda la química depende en último término del análisis, habiendo sostenido Robert Alexander Chalmers (1920-2006), editor de *Talanta*, la tesis de que la química deba enseñarse como una rama de la química analítica; “la química, una rama de la química analítica” (Chalmers y Marr, 1973).

El descubrimiento del elemento vanadín, o vanadio (Tabla 8) como se le conoce en todo el mundo en su forma latinizada, es tan pintoresco como su química (Rehder, 2008); Uribe Salas, 2020). En la Tabla 8 se recogen trabajos sobre el vanadio en cuyo título figura la palabra “descubrimiento” en los idiomas español, francés, inglés o alemán.

Como la mayor parte de los metales de transición, el vanadio existe en un amplio rango de estados de oxidación (Fig. 1), más comúnmente de +2 a +5, aunque existe en todos los estados desde -1 a +5 e incluso el raro estado -3 es conocido en el  $V(CO)_5^{3-}$  y puede por tanto tomar parte en procesos de transferencia de carga (Anon, n.d., Davis, 1968; Oelen, n.d., Taroni, 2017). Su química redox es clave en aplicaciones en sistemas biológicos (e.g. Guevara García, 1996), siendo en este caso los estados de oxidación +3, +4, y +5, los más importantes (Ligtenbarg, 2001) y en electroquímica, habiéndose ideado baterías de flujo de vanadio para almacenar energía en electrolitos líquidos en lugar de electrodos (Taroni, 2017). La química de los compuestos de cromo, su vecino inmediato en la tabla periódica con número atómico  $Z = 24$ , también llama la atención (Lennartson, 2014) por la variedad de sus colores. Una propiedad importante de los complejos de Cr(III) es que el intercambio de ligando es lento. Si se calienta por otra parte óxido de cromo(III) (gris) con carbonato de potasio y nitrato de potasio, la mezcla se torna lentamente de color amarillo. Este cambio de color proviene de la formación de

**TABLA 8**  
**TRABAJOS EN LOS QUE EN EL TÍTULO FIGURA DESCUBRIMIENTO, DISCOVERY**  
**O ENTDECKUNGSGESCHICHTE**

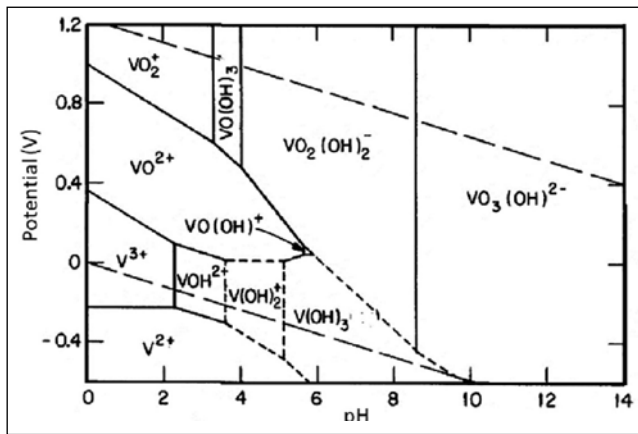
AÑO	COMENTARIO	AUTOR/ES
2021	Andrés Manuel del Río descubridor del vanadio y adalid de la independencia de México	Castillo Martos
2021	Del Río descubridor del eritronio, hoy vanadio	Pinto Cañon
2020	Realce de la labor de Andrés Manuel del Río por parte del Ayuntamiento de Madrid	Pinto Cañon
2020	Desde el descubrimiento del vanadio a su rol en la vida	Sánchez Lara
2020	Historia del vanadio y disputa por su autoría	Uribe Salas
2019a	Historia del descubrimiento del vanadio	Ramirez Sagaon
2019b	Validación del descubrimiento del vanadio en Europa	Ramirez Sagaon
2017	El resurgir del discurso científico en el continente americano y reivindicaciones de conocimiento en el descubrimiento en México del vanadio	Collado Reyes et al.
2010	Andrés Manuel del Río y el descubrimiento del vanadio	Ortega y Valera
2004	Rutas hacia los nombres y epónimos químicos: descubrimiento, prioridad y crédito	Cintas
2004a	Redescubrimiento de los elementos. Segundo descubrimiento del vanadio	Marshall y Marshall
2004b	Redescubrimiento de los elementos. El descubrimiento del vanadio	Marshall y Marshall
2003	Redescubrimiento de los elementos. El vanadio	Marshall y Marshall
1956	Monografía sobre el descubrimiento de los elementos	Weeks
1951	Sefström y el descubrimiento del vanadio	Sjöberg
1933	El descubrimiento del vanadio	Wittich
1932	Descubrimiento de los elementos: vanadio (carta Ed.)	Strauss
1932a	El descubrimiento de los elementos: columbio (niobio), tántalo y vanadio	Weeks
1932b	Descubrimiento de los elementos. Vanadio	Weeks
1922	El descubrimiento del vanadio	Wittich
1892	Descubrimiento del vanadio	Rodríguez Mourelo

cromato de potasio  $K_2CrO_4$ , en el que el cromo se encuentra en el estado de oxidación +6. Otros compuestos de  $Cr^{6+}$  incluye el vistoso dicromato de potasio,  $K_2Cr_2O_7$ , el tricromato de potasio,  $K_2Cr_3O_{10}$  y el óxido de  $Cr^{6+}$  rojo,  $CrO_3$ . Los diagramas potencial-pH de las distintas especies del vanadio y cromo se muestran en las Figs. 2 y 3.

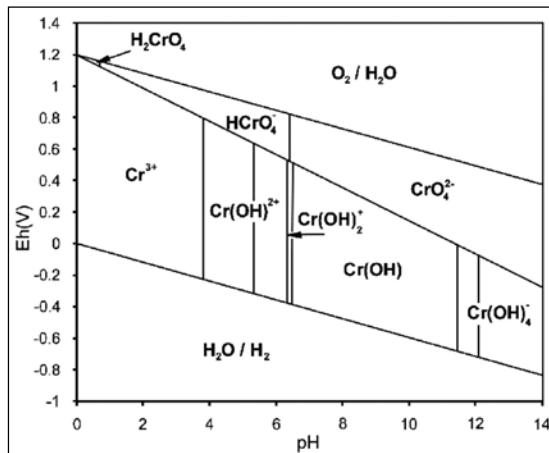
**FIGURA 1**  
**DE IZQUIERDA A DERECHA:  $[\text{V}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  (LILA),  $[\text{V}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$  (VERDE),  $[\text{VO}(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$  (AZUL) Y  $[\text{VO}(\text{H}_2\text{O})_5]^{3+}$  (AMARILLO)**



**FIGURA 2**  
**DIAGRAMA POTENCIAL-pH DEL VANADIO (CRANS ET AL., 2004)**

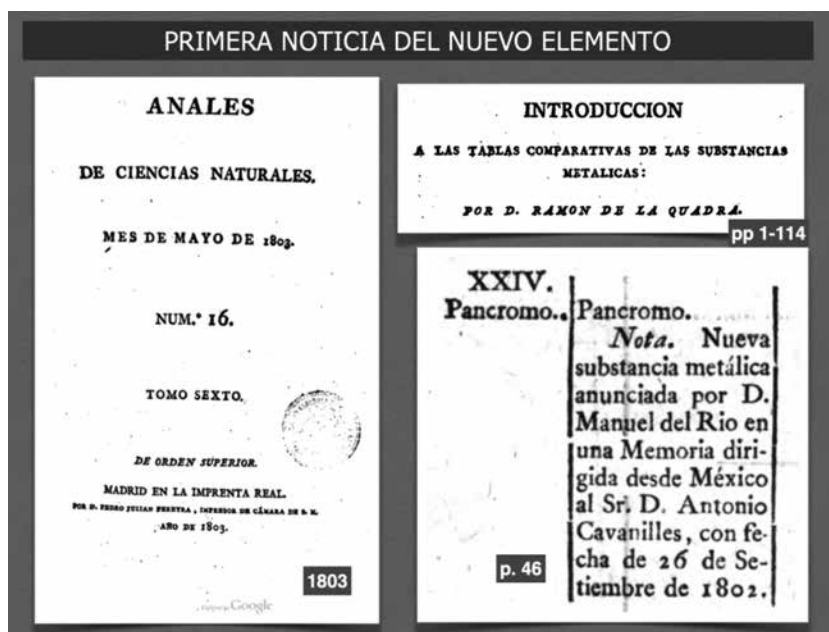


**FIGURA 3**  
**DIAGRAMA POTENCIAL-PH DE LAS ESPECIES DE CROMO (SCANCAR Y MILACIC, 2014)**




Andrés Manuel del Río y Fernández descubrió el vanadio cuando experimentaba con el plomo pardo de Zimapán de la mina la Purísima del Cardonal en Hidalgo. Fascinado por las diferentes sales coloreadas del nuevo elemento obtenido en diversas preparaciones, lo llamó Pancromo. Una breve nota sobre este descubrimiento se recoge (Fig. 4) en los Anales de Ciencias Naturales (Madrid) (Del Río, 1803, p. 46):

FIGURA 4  
PRIMERA NOTICIA DEL NUEVO ELEMENTO DESCUBIERTO POR DEL RÍO EN EL PLOMO PARDO DE ZIMAPÁN (ESTADO DE HIDALGO)



Del Río rebautizó posteriormente el nuevo elemento como *eritrono* (eritronio), en referencia al color rojo obtenido cuando las sales de metales alcalinos y alcalinotérreos del nuevo metal se calentaban o trataban con ácidos. Dado que sus propiedades eran análogas a las del cromo, influenciado por Alexander von Humboldt, del Río perdió la confianza en su descubrimiento (Figs. 5 a 7), desalentado en adición más adelante por un análisis desafortunado (Fig. 8) (Wikipedia, n.d.; Wikimonde; n.d.) llevado a cabo por Hippolyte Collet-Descotils (1773-1815), por lo que señaló que el supuesto nuevo elemento no era más que cromo, renunciando de hecho a su descubrimiento.

FIGURA 5  
ANDRÉS DEL RÍO: PRIMERA SOMBRA DE DUDA DEL DESCUBRIMIENTO



30 ANALES

*Discurso de las vetas, leído en los actos del Real Seminario de Minería por D. Andres del Río.*

pp 30-48

1 Este discurso se publicó en la gaceta de México del **Viérnes 13 de Noviembre de 1801**, números 12 y 13, con algunas notas, que el mismo autor acaba de reformar y corregir, descando que ahora se imprima qual se publica aqui, para que se vea su opinion.

\*\*\* *De este plomo pardo saqué 14,80 por 100 de un metal que pareciéndome nuevo llamé pancromo, por la universalidad de colores de sus óxidos, disoluciones y precipitados; y luego eritrono, porque daba con los álkalis y las tierras sales que se ponían*

p. 31


*rozax al fuego y con los ácidos; pero habiendo visto en Fourcroy que el ácido crómico da tambien por evaporacion sales rozax y amarillas, creo que el plomo pardo es un cromato de plomo con exceso de base en estado de óxido amarillo. Hasta ahora se tenía por fosfato de plomo: sin duda Klaproth analizó algun plomo verde de los que pardean. Esto y su cristalización me induxo tambien á error en la primer analisis que hice antes de conocer los caracteres de Werner.*

p. 32

ANALES 424  
DE CIENCIAS NATURALES.  
MES DE FEBRERO DE 1804.  
NUM. 19.  
TOMO SEPTIMO.  
DE ORDEN SUPERIOR.  
MADRID EN LA IMPRENTA REAL  
DEL Sr. MANRIQUE REALISTA, CONTINUA EN OBRAS M. N. A.  
AÑO DE 1804.  
1804

FIGURA 6  
SISTEMA DE LOS CONOCIMIENTOS QUÍMICOS DE FOURCROY, TOMO V, ARTÍCULO V SOBRE EL CROMO.


<http://www.sabix.org/bulletin/b23/23-fourcroy.jpg>



Antoine-François de Fourcroy (1755-1809)

SYSTEME  
DES  
CONNAISSANCES CHIMIQUES,  
ET DE LEURS APPLICATIONS  
AUX PHÉNOMÈNES  
DE LA NATURE ET DE L'ART,  
PAR A. F. FOURCROY,  
De l'Institut national de France, Chimiste, Officier National de mérite, et  
Membre d'Académie Royale, de l'Académie des Sciences et de l'Académie de  
Médicine, des Sociétés Royales de Philosophie, d'Agriculture,  
d'Économie animale, de la Société royale d'Histoire, de celle des  
Lettres de Paris, de celle des Sciences de Turin, de l'Académie  
de Lyon, de ses Académies de physique, Anatomie et Médecine  
Chirurgie.

TOME V.



PARIS,  
Bachelier, Imprimeur de l'Institut national des Sciences, et  
des Arts, rue de la Harpe, au Commerce, au N. N. 177.

BRUMAIRE AN IX 1800-1801

SECT. VI. ART. 5. *Du chrome et de son acide.* 107  
peut se caractériser d'origine et être modifié par cette transfor-  
mation; cependant il paraît caractériser l'acide chromique  
qu'on distille sur lui; puisqu'il devient bleu par son action.  
Des expériences ultérieures sont nécessaires sur ce point.  
16. L'acide molybdique n'est encore d'aucun usage; il n'a  
encore été qu'un objet de recherches et de curiosités pour les  
chimistes. L'exemple de l'acide tungstique dont le citoyen  
Goytan a déjà reconnu une propriété utile pour la teinture,  
doit engagez les chimistes à s'occuper sous ce point de vue  
de l'acide molybdique.

ARTICLE V.  
*Du chrome et de son acide.* \*

S. I.  
*Du chrome métal.*  
A. Histoire.

1. L'analyse d'un minéral, faite par d'autres moyens et  
avec plus de soins qu'on n'en avait encore mis dans son  
examen, vient de présenter (en Brumaire an 6, décembre  
1797) un citoyen Vauquelin la découverte de ce nouveau métal.  
Le plomb rouge de Sibirie lui avait paru, dans plusieurs  
essais préliminaires, offrir des propriétés qu'il ne trouva  
dans aucune autre substance. Ayant fait des expériences  
suivies sur cette mine, soigneusement triée et très-pure  
abondante dans son cabinet, il a reconnu qu'elle étoit formée  
d'oxide de plomb et de 0,36 d'un acide nouveau, que  
Bainboim et plusieurs autres chimistes avaient pris pour de  
l'acide molybdique, mais qui en diffère beaucoup plus qu'il



FIGURA 7  
ANDRÉS DEL RÍO: SEGUNDA SOMBRA DE DUDA DEL DESCUBRIMIENTO

**TABLAS MINERALOGICAS**  
DISPUESTAS  
SEGUN LAS PROPIEDADES DE LOS MINERALES  
Y SUSTRADIDAS CON NUESTRA  
POR D. G. DEL RÍO

1804

PAR DON JOSEPH DE ANGELES DEL RÍO

**Annales de Chimie** 1805, 53, 268-271

**Annalen der Physik** 1805, 10, 177-180

**PARÉCÍNDOME** nueva esta sustancia, la llamé *pancromo* por la universalidad de colores de sus óxidos, disoluciones, sales y precipitados, y después *eritrono* por formar con los alkalis y las tierras sales que se ponían rojas al fuego y con los ácidos; pero habiendo sabido que el cromo da también por evaporación sales rosas y amarillas, creo que el plomo pardo es un óxido amarillo de cromo combinado con exceso de plomo en forma también de óxido amarillo.

**DIETRICH LUDWIG GUSTAV KARSTEN**

FIGURA 8  
ANÁLISIS POR COLLET-DESCOTILS DEL PLOMO PARDO DE ZIMAPÁN, DEL REINO DE MÉXICO, ENVIADO POR HUMBOLDT, EN EL QUE DEL RIO DICE HABER DESCUBIERTO UN NUEVO METAL

**Hippolyte Victor Collet-Descotils (1773-1815)**

**Annales de Chimie** 1805, 53, 268-271

**Annalen der Chemie** 1805, 10, 177-180

**Nicolas Vauquelin (1763-1829)**, Salle de Actes, Faculté de Pharmacie (Paris)

**ANNALES**

268 tités que j'ai trouvées dans l'échantillon que j'ai soumis à l'analyse.

Oxide d'étain (1)	95.
Oxide de fer	5.
	100.

*Analyse de la mine brune de plomb de Zimapan, dans le royaume du Mexique, envoyée par M. Humboldt, et dans laquelle M. Del Rio dit avoir découvert un nouveau métal.*

**PAR LE MÊME.**

Cette mine chauffée au chalumeau sur un charbon, donne quelquefois une légère odeur d'arsenic; elle se fond bientôt, et, après un bouillonnement assez fort, on aperçoit de petits globules de plomb qui tapissent le charbon. Chauffée avec du borax, elle s'y dissout facilement et lui donne une couleur verte d'émeraude peu intense.

(1) En comparant ce résultat avec l'essai par la voie sèche, on voit que l'étain est, dans cette mine, à peu près au même état que celui qui a été oxidé par l'acide nitrique; c'est-à-dire, que sur 140 il contient 40 d'oxygène.

**DE CHIMIE.** 269

M. Del Rio ayant annoncé que ce minéral ne contient ni chrome ni urane, j'ai cherché d'abord à me convaincre de la vérité de cette proposition. En conséquence, après avoir pul-

Pour connaître avec précision les proportions des parties constituantes de la mine de M. Del Rio; je fis une nouvelle expérience, dans laquelle je déterminai la quantité d'acide muriatique, à l'aide du nitrate d'argent: voici les proportions que j'ai trouvées.

Plomb métallique	69
Origine présumé	5,2
Oxide de fer insoluble dans l'acide nitrique	3,5
Acide muriatique sec	1,5
Acide chrôdique	16
	95,2
Perte	4,8
	100

Les expériences que j'ai rapportées me paroissent suffisantes pour prouver que cette mine ne contient point de nouveau métal.

**Tome LIII.** T



El mineral había sido entregado por Del Río a Humboldt con motivo de su visita a México en 1803-1804, que divulgó la noticia en las revistas europeas (Figs. 9 a 11), y llevó una muestra al Museo für Naturkunde de Berlín en 1805. Una segunda muestra del plomo pardo fue enviada al laboratorio de Collet-Descotils en París, que analizó la muestra en 1805, llegando a la conclusión de que el mineral contenía cromo (descubierta en 1797). Collect-Descotils, discípulo de Vauquelin, ingeniero jefe del Cuerpo Real de Minas fue uno de los 151 miembros de la Comisión de Artes y Ciencias que acompañó a Napoleón Bonaparte (1769-1821) a Egipto en 1798, y que operó allí tres años (Gillispie, 1989; Laissus, 1998), expedición científica liderada por Claude Louis Berthollet (1748-1822) y Gaspard Monge (1746-1811). Joseph Louis Gay Lussac (1778-1850) escribió su obituario (Gay Lussac 1815 a,b) tras fallecer a los 42 años.

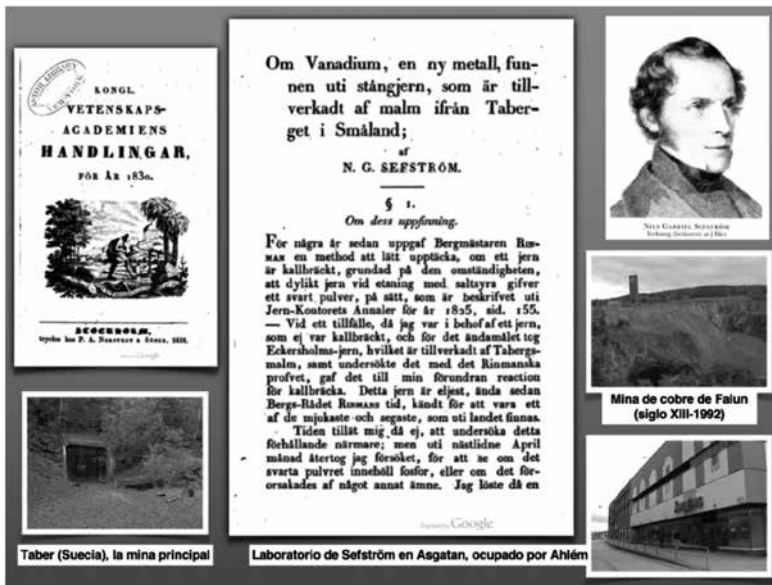
Desde el punto de vista actual, parece extraño que las diferencias obvias entre el comportamiento químico del cromo y el eritronio fueran pasadas por alto en los experimentos llevados a cabo por el mismo del Río y por Collet-Descotil, un químico renombrado de su tiempo: cuando se agrega amoníaco a vanadinita digerida, se obtiene vanadato de amonio blanco (el cromato de amonio es amarillo). Cuando se calienta, se forma  $V_2O_5$  rojo brillante; y cuando se trata con ácidos, se forma una solución roja de decavanadato (esencialmente  $[H_2V_{10}O_{28}]^{4-}$ ). Las respectivas reacciones con cromato producen  $Cr_2O_3$  verdoso y dicromato naranja.

A mediados de la década de 1820, Nils Gabriel Sefström (1787-1845), químico y médico, que enseñaba química en la Escuela de Minas en Falun (Suecia), comenzó a investigar un polvo negro obtenido al tratar las barras de hierro procedentes de Taberg con ácido clorhídrico. El Taberg, la zona más alta de la provincia de Småland situada al Sur de Suecia, se eleva hasta 343 m, y es rica en mineral de hierro. Reanudó sus estudios en abril de 1830, descubriendo una sustancia que tenía ciertas propiedades en común con el cromo y con el uranio, aunque pronto descubrió que la sustancia lo que contenía era algo completamente nuevo. Los experimentos se continuaron en los laboratorios de Berzelius, de quien era discípulo, en los que se estableció la coloración azul de los estados de oxidación inferiores del nuevo elemento como una de sus peculiaridades (Sefström, 1830; 1830-1831; 1831a; 1831b; 1831c).

Sefström propuso originalmente el nombre odinium para el nuevo metal. Odín es el dios de los vientos en la mitología germánica del norte (Wotan para las tribus germánicas del sur), pero después pidió a Berzelius que eligiera un nombre mejor porque el de odinio “encaja tan mal en francés e inglés” (det passer så illa in franskan och engelskan), por lo que pasó a denominarse de forma provisional erian, de Erianae, un sobrenombre de Atenea (Minerva), la diosa griega (romana) de la sabiduría, según reza en la carta de Berzelius a Friedrich Whöler (1800-1882) de 27 de diciembre de 1830 (A.W.H., 1882).

Whöler, en su contestación a Berzelius el 4 de enero 1831 utilizó el nombre de sefströmium. Sefström finalmente eligió el nombre vanadín (‘på latin Vanadium’) para el nuevo metal, de Vanadis, un epíteto de la diosa nórdica Freya – Esposa de Odín, la diosa más aristocrática de la mitología gótica (den förnämsta gudinnan uti göthiska Mythologien), que simboliza la belleza y la fertilidad, características destacadas de la

FIGURA 12  
TRABAJO DE SEFSTRÖN SOBRE EL DESCUBRIMIENTO DEL VANADIO



química del vanadio. Vanadis se representa en actitud marcial con la lanza en ristre sobre un carro tirado por gatos, animales sagrados para las tribus germánicas del norte. El hecho de que ninguno de los elementos conocidos hasta entonces comenzara con la letra V supuso un motivo adicional para decantarse por la elección (hvars begyennelsebokstaf ej förekommer...enkla kroppars namn).

Wöhler no llegó a descubrir el vanadio por un pelo, por lo que Berzelius para levantar su ánimo y describir su infortunio ideó una historia sutil (carta de 22 de enero de 1831):

“En cuanto a la muestra que me enviaste, quiero contarte la siguiente anécdota: En los tiempos pasados la bella y encantadora diosa Vanadis vivía en el norte lejano. Un día, alguien llamó a su puerta. La diosa permaneció confortablemente sentada y pensó: Sea quien sea que llame de nuevo; pero no se repitió la llamada, y quien lo había hecho se marchó bajando los escalones. La diosa sintió curiosidad por ver quién se tornaba tan indiferente a ser recibido, se asomó a la ventana y observó quién se alejaba. ¡Pobre de mí! se dijo a sí misma, es ese bribón (Schalk) de Wöhler. Bueno, seguramente se lo merece; si se hubiera preocupado un poco, habría sido admitido. El tipo ni siquiera miró por la ventana al pasar. Transcurridos unos días, alguien volvió a llamar de nuevo a la puerta, y esta vez los golpes se repitieron. La diosa finalmente accedió a abrir la puerta. Entró Sefström, y de este encuentro nació el vanadin”-

Wöhler comenzó en 1828 a investigar el mineral de plomo pardo remitido por Humboldt y comprobó que sus propiedades, a diferencia de lo establecido por Collet-Descoitil, no coincidían con los del cromo. Wöhler enfermó y cesó en sus intentos. Más tarde, comentó en una carta a Berzelius: “Fui un asno (Ich war ein Esel) por no haber descubierto (el vanadín) hace dos años en el mineral de plomo pardo de Zimapán. Wöhler no fue el único desafortunado: durante el invierno de 1830-1831, James Finlay Weir Johnston (1796-855), químico escocés, discípulo de Berzelius, analizó un mineral de plomo de Wanlockhead (Escocia), descubriendo una nueva sustancia parecida al cromo (Johnston, 1831a, Johnson, 1831b; Johnston, 1831c). Advirtió su verdadera identidad mientras leía la carta de Berzelius a Pierre Louis Dulong (1785-1838), presentada en la Académie Royale en París el 7 de febrero de 1831, en la que se anunciaba el descubrimiento.

En una segunda carta (Carrière, 1893) a Berzelius, el 9 de enero de 1831, Wöhler adjuntó la muestra del polvo blanco aislada, sugiriendo que podría ser erianóxido. Wöhler finalmente demostró que la muestra del mineral de Zimapán que obraba en su poder era idéntica a la nueva vanadina metálica de Sefström (de barras de hierro y escoria), lo que llevó a Gustav Rose (1798-1873) a agregar Vanadinbleierz (mineral de vanadio y plomo; en realidad, vanadinita  $Pb_5(VO_4)_3Cl$ , que es isomorfo con hidroxiapatita) a la etiqueta original de Humboldt (Fig. 13) que describe el mineral Zimapán exhibido en el museo de Berlín. Berzelius (1831a, b, c, d, e; 1832) da a conocer el nuevo elemento (Figs. 14 y 15).

FIGURA 13

**MUESTRA DE PLOMO PARDO CON LA FICHA DE HUMBOLDT DONDE APARECE: “EL SR. DEL RÍO CREYÓ ENCONTRAR AHÍ UN NUEVO METAL QUE LLAMÓ PANCROMO Y LUEGO ERITRONIO. AL FINAL RECONOCIÓ HABER ENCONTRADO CROMO ORDINARIO (MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE BERLÍN)**

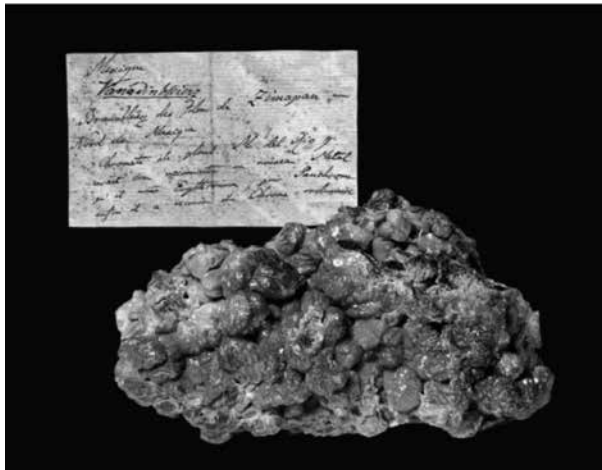


FIGURA 14  
TRABAJO DE BERZELIUS SOBRE EL VANADIO EN LA REVISTA SUECA

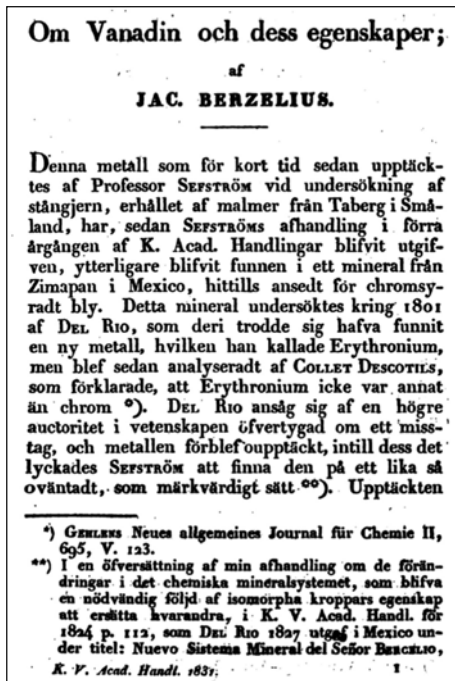
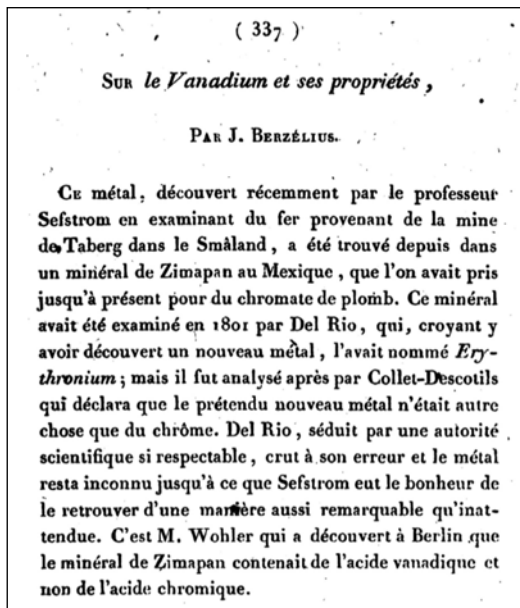


FIGURA 15  
TRABAJO DE BERZELIUS EN ANNALES DE CHIMIE ET DE PHYSIQUE



Berzelius en el trabajo “Sobre el vanadio y sus propiedades” (Figs. 14 y 15) comenta: “Este metal, descubierto hace poco tiempo por el profesor Sefstrom al examinar las barras obtenidas de los minerales de Taberg en Smaland, había sido encontrado antes en un mineral de Zimapán en México, considerado hasta el presente como cromato de plomo. Este mineral había sido examinado por Del Rio en 1801, quien creyó haber descubierto en él un nuevo metal, al que llamó eritronio, pero analizado luego por Collet Descotils, éste declaró que el pretendido nuevo metal no era otra cosa que cromo. Del Río, seducido por una autoridad científica tan respetable, creyó en el error y el metal permaneció sin descubrir hasta que Sefström tuvo la fortuna de encontrarlo de una manera tan inesperada como notable. Es Wohler quien ha descubierto en Berlín que el mineral de Zimapán contenía ácido vanádico y no el ácido crómico”.

El principio (argumento) de autoridad se traduce en una proposición científica que se acepta por el solo hecho de estar afirmado en un texto considerado como cierto y no sujeto a debate científico (Asuero, 2015; Asuero, 2019). A lo largo de la historia se establecen una larga serie de conflicto entre ideas asumidas y nuevas propuesta. Diversos autores, insisten en ser esta la causa de la marcha atrás de Del Rio, aunque otros, discrepan de esta tesis.

“Del Rio, séduit par une autorité scientifique si respectable, crut à son erreur et le métal resta inconnu jusqu’à ce que Sefstrom eut le bonheur de le retrouver d’une manière aussi remarquable qu’inattendue” (Berzelius, 1831a,c)

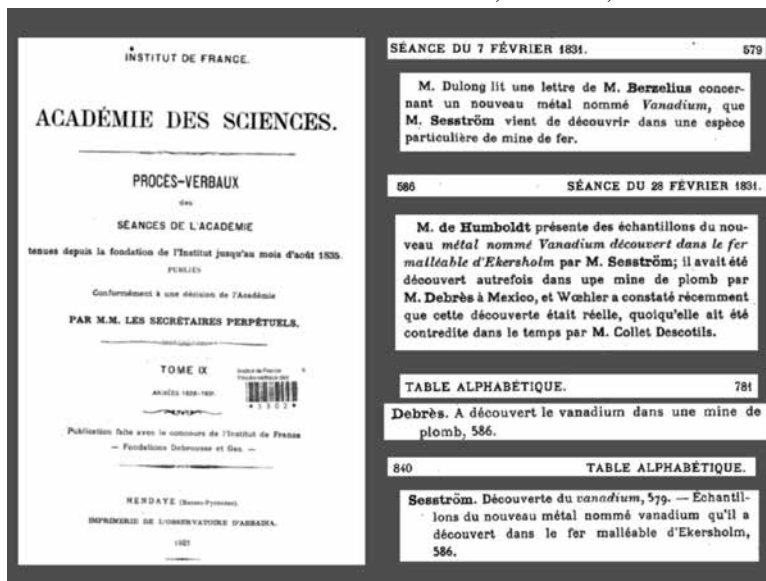
“The prestige enjoyed by both the author and his laboratory, the authority of the experimental replication process plus the use of a journal as a public mechanism for the accreditation of result created a powerful mechanism to discredit knowledge generated outside the dominant international terrain in the field of mineralogy” (Collazo-Reyes et al., 2017).

“The observation, therefore, of Berzelius, that Del Rio was induced to alter his opinions in reference to the composition of the Zimapan mineral, out of respect to scientific authority is incorrect” (Thompson, 1835, p. 36).

“La plupart des auteurs affirment que c’est l’opinion de Collet-Descotils qui à fait revenir Del Rio sur la première idée. Mais c’est là un point douteux aujourd’hui » (Parmentier, 1886, p. 69 ; Jagnaux, 1891, p. 342)

En la sesión de la Académie des Sciences del 7 de Febrero de 1831 Dulong lee la carta de Berzelius concerniente al nuevo metal vanadio y en la sesión de 28 de febrero de 1831 (Fig. 16) Humboldt presenta muestras del nuevo *metal denominado Vanadio descubierto en el hierro maleable d’Ekersholm por M. Sesström* (note que el nombre está mal escrito); que ya había sido descubierto hace tiempo en una mina de plomo por M. Debrès (debería decir Del Rio) en México, y Woehler ha constatado recientemente que este descubrimiento era real, aunque fue contradicho en su momento por M. Collet Descotils. Extractos de la carta aparecen en variadas revistas científicas (Figs. 17 a 19)

FIGURA 16  
 PROCES-VERBAUX DES SEANCES DE L'ACADEMIE, TOME IX, CORRESPONDIENTE



La polémica está servida. George William Featherstonhaugh (1780-1866), editor del “Monthly American Journal of Geology and Natural Science” apuesta por el término zimapanio para el nuevo metal, pero se aventura (para que se haga justicia) a que el nombre provisional del vanadio sea sustituido (Fig. 20) por el más compendioso de rion o rionium . Ve claro que Del Río fue inducido primeramente por Humboldt para hacerle dudar de su propio descubrimiento, y posteriormente, cuando Descotils -que estaba familiarizado con el descubrimiento de Vauquelin de la naturaleza metálica del cromo y cuyo alumno creemos que fue- puso el peso en la balanza de Humboldt (Editor, 1831). Featherstonhaugh publica una carta de Del Río, cuyo final se muestra en la Fig. 21, en la que cuenta, desde su óptica personal, la historia, y más tarde, Fig. 22, la comunicación de Del Río sobre el descubrimiento del nuevo metal en el plomo pardo de Zimapán.

Del Río se quejaba amargamente por los treinta años perdidos.

“Had Del Rio been in Europe, this matter would have been properly arranged long ago (Featherstonhaugh, 1832).


Berzelius, Johnston y otros intentaron en vano aislar el metal. La reducción de óxido de vanadio con carbono o potasio, o de cloruros de vanadio ( $VCl_3$ ,  $VOCl_3$ ) con potasio o amoníaco, conduce a carburos, siliciuros, nitruros (VN) u óxidos de estados de oxidación inferiores (VO). La primera generación aparentemente exitosa de vanadio metálico fue realizada por Sir Henry Enfield Roscoe (1833-1915) en 1869 mediante la reducción de  $VCl_2$  con hidrógeno en un largo experimento.



FIGURAS 17, 18 Y 19  
 REFERENCIAS A LA CARTA DE BERZELIUS A DULONG EN DIFERENTES  
 REVISTAS CIENTÍFICAS

Journal de Pharmacie et des Sciences Accessoirs 1831 17 218

**BULLETIN**  
 DES TRAVAUX DE LA SOCIÉTÉ DE PHARMACIE  
 DE PARIS,  
 Rédigé par M. Roussel, secrétaire général, et par une  
 Commission spéciale.



EXTRAIT DU PROCÈS VÉRAL.  
 Séance du 9 mars 1831.  
 PRÉSENCE DE M. DULONG.




M. de Humboldt présente des échantillons de vanadium, nouveau métal que M. Sefstrom a découvert récemment. Les échantillons remis par M. de Humboldt proviennent d'un minerai plombifère de Zimampas, au Mexique. Ce minerai, ayant été analysé il y a plusieurs années par M. del Rio, professeur à l'école des mines de Mexico, ce chimiste en retira un métal qu'il crut nouveau et qu'il désigna par le nom d'érythronium. Un échantillon de cette matière fut remis à M. Descotil, qui déclara que ce n'était que du chrome impar, l'opinion de ce savant prévalut alors. Mais depuis la découverte du vanadium, M. Whoeler, ayant examiné de nouveau le minerai de Zimampas, reconnut que le métal découvert par M. del Rio était bien réellement du vanadium.

Journal of the Royal Institution of Great Britain 1831, 562

CHEMISTRY.

*New Metal Vanadium.*—At the meeting of the Académie des Sciences, on the 7th February, M. Dulong read a letter from M. Berzelius, announcing the discovery of a new simple substance by M. Sefstrom, director of the mines of Fahlun, in Dalecarlia. M. Sefstrom having occasion to examine an iron remarkable for its softness, observed the presence of a body which appeared new to him, and which he succeeded in separating, but in too small a quantity to determine its properties. He afterwards observed that cast-iron contained much more of it than wrought iron, which induced him to suppose that he should find still more in the scoria, in which he was not deceived, as he obtained it in considerable quantities. It appears to be a new metal, to which he has given provisionally the name of *Vanadium*, derived from an ancient deity of the Scandinavians.


At the meeting of the Academy on the 28th February, M. de Humboldt exhibited a specimen of this new metal. He stated that the same metal had been discovered in Mexico, by M. del Rio, in a brown lead ore found in the district of Zimampas. M. del Rio gave it the name of *Erythronium*, but was afterwards induced to suppose that it was not a simple substance, but merely an impure chrome. Since the discovery of M. Sefstrom, however, the brown lead ore of Zimampas has been again analysed, and a simple substance, precisely similar to that found in the iron by M. Sefstrom, obtained from it. See page 625 of *Miscellanea*.



NEW METAL, PROVISIONALLY CALLED VANADIUM.

Extract of a Letter from M. Berzelius to M. Dulong, read before the Academy of Natural Sciences at Paris, Feb. 7, 1831.

"M. Sefström, director of the school of mines at Fahlun, whilst engaged in examining a variety of iron remarkable for its extreme softness, observed the presence of a substance, the properties of which differed from those of all other known bodies; but its quantity was so small as would have rendered it tedious and expensive to collect sufficient for an examination of its properties. This iron was from the mine of Taberg in Smoland; the ore merely contained traces of the substance. Finding that the pig iron contained far more of this principle than the wrought iron, M. Sefström thought that the scoria formed during the conversion of the pig iron into wrought metal, might be a more abundant source—a conjecture confirmed by experience; so that sufficient having been procured, he went to Mr. Berzelius during the Christmas holidays, to complete its examination. For the present the substance is called Vanadium, after a Scandinavian divinity.



Isis 1938, 29(1) 49-57

Glaucar Sefströmbreen (Spitzbergen)

Pico de Sefströmkammen

\* On the 28th of February, M. Humboldt stated that the same metal had been discovered in Mexico, by M. Del Rio, in a brown lead ore from Zimampas; who had named it Erythronium, but was induced to suppose it was a simple substance, but an impure chrome; upon a re-analysis of the ore of Zimampas, it is found the metals are identical.

Monthly American Journal of Geology 1831 1(1) (July) 67-70

FIGURA 20  
COMENTARIO DE FEATHERSTONHAUGH, A LA CARTA DE BERZELIUS DIRIGIDA  
A DULONG SOBRE EL DESCUBRIMIENTO DEL VANADIO

**George William Featherstonhaugh (1780-1866)**

[https://es.wikipedia.org/wiki/George\\_William\\_Featherstonhaugh](https://es.wikipedia.org/wiki/George_William_Featherstonhaugh)

We should under any circumstances expect objections to be made to the term *Vanadium*, derived from an ancient Scandinavian Deity. We dislike the introduction of such puerilities into science. Far better would be the term *Zimapanium*, since it was first found in the brown lead ore of Zimapan. But upon this occasion, that the complete measure of justice may be done to an eminent and deserving philosopher, we venture to express a hope that in place of the provisional name *Vanadium*, the more compendious one of *Riom* or *Rionium*, may be substituted.

It is very clear that Del Rio was first induced by Humboldt, to doubt of his own discovery, and, subsequently, when M. Descotils—who was familiar with Vauquelin's discovery of the metallic nature of chrome, and whose pupil indeed we believe he was,—threw his weight into the scale of Humboldt, M. Del Rio diffidently forbore to press his own better opinions, against those of the Europeans, whom he supposed possessed of superior opportunities of judging than himself, and likely to unite against him.

EDITOR.








FIGURA 21  
CARTA DE DEL RÍO (1831) AL EDITOR DE MONTHLY AMER. J.


I communicated my experiments to Baron Humboldt, when he arrived in Mexico, and he stated to me, that my metal had the strongest resemblance to chrome, especially on account of the fine emerald green it takes when under the blow-pipe: which occasioned me to observe both in my translation of Karsten, in the year 1804, and in the nineteenth number of the *Annals of Natural Sciences*, which were then published at Madrid, under the direction of the celebrated Cavanilles, that I supposed it to be a sub-chromate of lead. M. Descotils, a year afterwards, expressed the same opinion. I confess, however, I could not suppress my astonishment, that no one took any notice of what I believed to be a blue oxide, nor of the beautiful phenomenon of the colouring of the salts red, by nitric acid, or by heat. I am content, however, with having always sustained that the brown ore of lead was not a phosphate, believing it identical with the brown lead of Schemnitz in Hungary, and of Huelgoet in Brittany.

You will please, Sir, to give these observations a place in your Journal, if you deem them worthy of insertion there. Its establishment is a source of great satisfaction to all those who know how well you deserve the reputation you have acquired.

I remain, Sir,  
Your affectionate Friend.  
A. DEL RIO.

TO MR. FEATHERSTONHAUGH.

**Estatua de Andrés Manuel del Río en el Seminario de Minería en la calle de Guatemala no. 90.**



**El Universal: El elemento químico descubierto en México 16/03/2019**

**Monthly American Journal of Geology 1831 1(1) 67-70**

FIGURA 22  
COMUNICACIÓN DE DEL RIO (1831) SOBRE EL DESCUBRIMIENTO DEL NUEVO METAL  
EN EL PLOMO PARDO DE ZIMAPAN

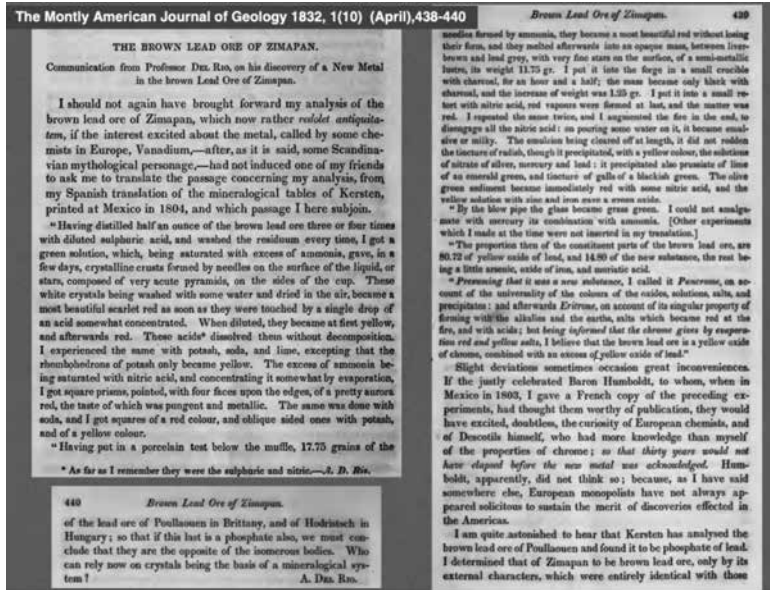
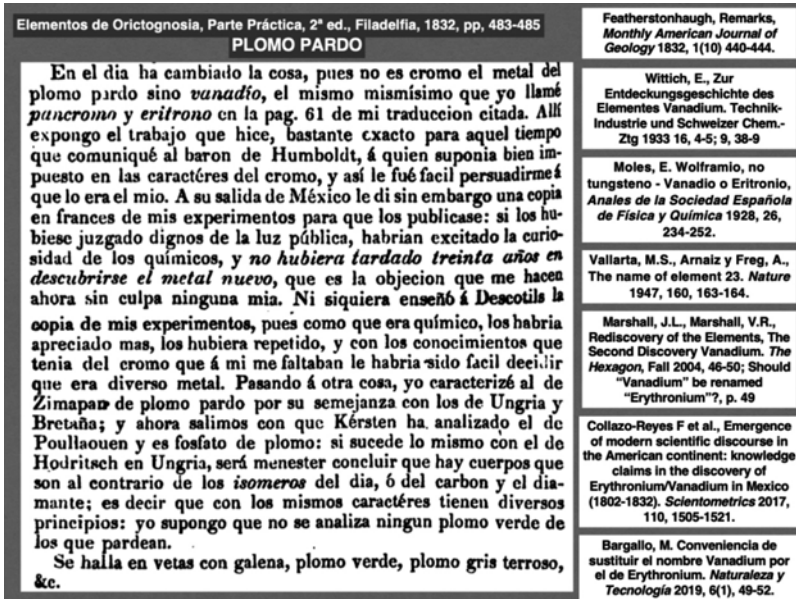


FIGURA 23  
COMENTARIO VANADIO, 2ª ORICTOGNOSIA, 2ª ED. (DEL RÍO, 1832)



## 7. LA OBRA DE DON ANDRÉS MANUEL DEL RÍO

Andrés Manuel del Río escribió más de 70 trabajos científicos entre libros, artículos, folletos y notas y publicó en cuatro idiomas: español, francés, alemán e inglés. En la Tabla 9 se recogen una parte de ellos y en la Tabla 10 las revistas científicas destinatarias.

**TABLA 9**  
**PUBLICACIONES DE DON ANDRÉS MANUEL DEL RÍO**

AÑO	COMENTARIO
1840	Del zimapanio publicado en El Zurriago
1836	Observaciones en réplica al Prof. Shepard
1835	Del zimapanio publicado en Revista Mexicana
1834a	Observaciones sobre el Tratado de Mineralogía de Mr. C.U. Shepard, con la traducción de las clases y órdenes de Breithaupt
1834b	Sobre la conversión de sulfuro de plata en plata nativa siguiendo el método de Becquerel
1834c	Minerales de plata reducidos por el método de Becquerel
1833	Sobre el desarrollo de los cristales de vermiculita por el calor
1832a	Elementos de Orictognosia, parte práctica, 2ª ed.
1832b	Suplemento de adiciones y correcciones a la Mineralogía
1831a	Minerales de plata reducidos por el método de Becquerel
1831b	El mineral plomo pardo de Zimapán
1829	Descubrimiento en México del ioduro de mercurio
1828	Análisis de dos nuevas sustancias encontradas en la región de Culebras: biseleniuro de zinc y sulfuro de mercurio
1827	Nuevo sistema mineral del Sr. Berzelio, traducido del francés 1835
1825a	Análisis de una aleación de oro y rodio (Annales de Chimie et de physique)
1825b	Análisis de una aleación de oro y rodio (Annals of Philosophy)
1822	Handbook de Mineralogía de von Hoffmann
1819	Carta dirigida por D. Andrés del Río al Sr. Barón de Humboldt
1811	Sobre el primer descubrimiento del cromo en el plomo pardo de Zimapán
1805a	Elementos de Orictognosia (segunda parte)
1805b	Noticia de un nuevo metal
1804a	Discurso de las vetas (Anales de Ciencias Naturales)
1804b	Discurso sobre las formaciones de las montañas de algunos Reales de minas
1803	Descripción de una piedra perlada
1802a	Discurso de las vetas (Gazeta de México)
1802b	Discurso de las vetas (Anales de Ciencias Naturales)
1800	Discurso de las vetas (Gazeta de México)
1795	Elementos de Orictognosia (conocimiento de los fósiles)

**TABLA 10**  
**REVISTAS CIENTÍFICAS: DON ANDRÉS MANUEL DEL RÍO**

Anales de Ciencias Naturales (Madrid)
Annales de Chimie et de Physique (Paris)
Annales de Mines (Paris)
Annalen der Physik (Halle)
Annals of Philosophy (London)
Archiv Für Bergbau und Hüttenwesen (Breslau)
Journal für Chemie und Physik (Nürnberg)
Monthly American Journal of Geology and Natural Science (Philadelphia)
Philosophical Magazine (London)
The American Journal of Arts and Sciences (New-Haven)
The Edinburgh Journal of Science (Edinburgh)
Transactions of the American Philosophical Society (Philadelphia)
Transactions of the Geological Society of Pennsylvania (Philadelphia)

En 1795 publicó su libro de orictognosia (Del Río, 1795; Amorós, 1964), el primero en América, que sería utilizado con gran provecho a lo largo del siglo XIX, ya que contenía conocimientos útiles para trabajar las minas, ya que identificaba las piedras minerales por su naturaleza y estructura (Uribe Salas, 2018). La segunda parte de la obra se publica en 1805.

## **8. BIOGRAFÍA Y BIBLIOGRAFÍA EN LA OBRA DE DON ANDRES MANUEL DEL RÍO**

Se han publicado muchos trabajos y unas cuantas monografías sobre Andrés Manuel del Río. En la Tabla 11 se muestran los estudios biográficos y en la Tabla 12 las fuentes en las que se enumeran sus contribuciones, que pueden consultarse para mayor detalle.

El elogio fúnebre corrió a cargo (Velázquez de León, 1849) del profesor de Geología y Zoología Joaquín Velázquez de León (1803-1882), alumno de Andrés del Río en la década de 1830, y nieto del criollo ilustrado Joaquín Velázquez de León y Cárdenas (1732-1786). La biografía de Ramírez (1891a,b) y el estudio crítico de Riart (2017) son muy completos. Uribe Salas glosa de forma magistral aspectos variados de su vida y obras (Uribe Salas, 2007; 2018; 2012; 2015; 2020; 2021; 2006; Uribe Salas y Cortes Zavala, 2006; 2014). Castillo Martos (2021, 2005) ha publicado también dos estudios monográficos muy completos. Andrés Manuel del Río goza de una entrada en el Dictionary of Scientific Bibliography, hecho que revela la importancia del personaje que nos ocupa (Holser, 1975).

**TABLA 11**  
**ESTUDIOS BIOGRÁFICOS SOBRE ANDRÉS MANUEL DEL RÍO**

AÑO	COMENTARIO	AUTOR/ES
n.d.	Biografía sobre Manuel Andrés del Río recogida en la web de la Real Academia de la Historia (España)	Acebes Pastrana
2021	Monografía en la que se incide en el descubrimiento del vanadio y en la colaboración en la independencia de México	Castillo Martos
2017	Trabajo muy bien detallado con abundante ilustración gráfica y referencias (90 pp)	Puche Riart
2014	Tres hombres de ciencia en la constitución del objeto geológico en México	Uribe Salas y Cortés Zabala
2006	Andrés Manuel del Río al frente del Seminario de Minería	Uribe Salas
2006	Tres protagonistas en el desarrollo de la ciencia mexicana en el siglo XIX	Uribe Salas y Cortés Zabala
2005	Andrés Manuel del Río, uno de los creadores de la ciencia moderna en España y en América	Castillo Martos
2003	El elemento dos veces descubierto: Andrés del Río y Alexander von Humboldt	Caswell
1986	Andrés Manuel del Río, químico y geólogo	Portela
1979	Breve biografía sobre un madrileño ilustre	López de Azcona
1975	Andrés Manuel del Río en el Dictionary of Scientific Biography	Holser
1966	Obra científica de Andrés Manuel del Río en el 2º centenario de su nacimiento	Prieto et al.
1965	Andrés Manuel del Río y su ilustre magisterio en México	Arnaiz y Freg
1964	Andrés Manuel del Río en el bicentenario de su nacimiento	Bargallo
1955	Obra científica de Andrés Manuel del Río y significación para la historia de México y América	Bargallo
1950	Homenaje a Andrés Manuel del Río en ocasión del primer centenario de su fallecimiento	Bargallo
1948	Andrés Manuel del Río descubridor del eritronio (vanadio)	Arnaiz y Freg
1937	El ilustre maestro Andrés Manuel del Río	Alessio Robles
1935	Contribuciones científicas de D. Andrés Manuel del Río	Weeks
1934	Contribuciones de Andrés Manuel del Río	Weeks
1934	Elementos biográficos y de la obra del Río con especial atención al descubrimiento del vanadio como parte del discurso de entrada en la RACEFN (*)	Mole
1891b	Biografía del Sr. D. Andrés Manuel del Río	Ramírez
1891a	Biografía del Sr. D. Andrés Manuel del Río	Ramírez
1855	Artículo biográfico de Andrés Manuel del Río en el Diccionario Universal	Diccionario Universal
1849	Obituario: Elogio fúnebre de D. Andrés Manuel del Río	Velázquez de León

(\*) Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Madrid)

**TABLA 12**  
**RELACIÓN DE LAS PUBLICACIONES DE DON ANDRÉS MANUEL DEL RÍO**

AÑO	COMENTARIO	AUTOR/ES
2017	Biografía de Andrés Manuel del Río	Puche y Riart
2006	Proyección Internacional de la Ciencia Ilustrada	Valera Candel
1923	Literatura geológica de Norte América	Nickless
1908	Boletín del Instituto Geológico y Minero	Aguilar y Santillán
1898	Boletín del Instituto Geológico y Minero	Aguilar y Santillán
1891b	Biografía de Andrés Manuel del Río	Ramírez
1891a	Biografía de Andrés Manuel del Río	Ramírez
1871	Catálogos de trabajos científicos	Royal Society of London

### ***9. ANDRÉS MANUEL DEL RÍO Y ALEXANDER DE HUMBOLDT: DOS SABIOS FRENTE A FRENTE***

Caswell (2003) ha realizado una semblanza de ambos sabios. Andrés del Río y Humboldt vivieron en una época de rápidos cambios en el estilo de vida, en la que la ciencia experimentaba un gran avance. Humboldt era un erudito, uno de los últimos científicos amateurs que soportaba sus investigaciones bien con su herencia o por el empleo en una de las profesiones tradicionales. Del Río formaba parte de la nueva generación de científicos más especializados que se ganaban el pan como profesores de sus ciencias en instituciones académicas. Esta tendencia iniciada en Freiberg y Stenitz continúa en la Escuela Politécnica de París y en las universidades tradicionales de la primera mitad del siglo XIX. Humboldt, uno de los científicos más influyentes de todos los tiempos (Rogers, 2010), educado en la perspectiva amplia de la Ilustración del siglo XVIII, retuvo sus puntos de vista sociales y políticos durante toda su vida. Del Río se movió desde una educación clásica (amplia) hasta una especialización más estrecha en la academia de minas; lo conocemos fundamentalmente por sus trabajos en química y mineralogía. Ambos diferían en su capacidad para aceptar los nuevos desarrollos teóricos en las ciencias; del Río era más conservador en este aspecto. Su labor original en geología fue escasa; prestó atención a los minerales mexicanos y a aspectos minerometalúrgicos.

Humboldt era un orador brillante, muy sociable, con talento para ser aceptado en cada lugar que visitaba; la mayoría de los intelectuales de Europa y América disfrutaron de su compañía. En su ensayo “Política sobre la Nueva España”, Humboldt tiene palabras de elogio para Del Río: “En México se ha impreso la mejor obra mineralógica que conoce la literatura española, el manual de orictognosia, compuesto por el señor del Río según los principios de la escuela de Freiberg, donde estudió el autor (Humboldt, 1827a, p. 237)”. “Esta máquina (con columna de agua en las minas de Morán), que es la primera de este género que se haya construido en América, es muy superior a las que existen

en las minas de Hungría; fue construida según los cálculos y planes del señor del Río, profesor de mineralogía de Méjico, que ha visitado las más célebres minas de Europa, y que reúne los conocimientos más sólidos y variados” (Humboldt, 1827b, p. 117).

Del Río plantea sus quejas a Humboldt por entenderse falto de reconocimiento: “... pero luego tuvo por más conveniencia regalársela a su amigo por la razón sin duda de que los españoles no debemos hacer ningún descubrimiento, por pequeño sea, de química ni de mineralogía, por ser monopolio extranjero...” (Del Río, 1819), y también: “...o perdí todo el mérito de ella por haber ignorado en 1802 todas las propiedades del cromo en un país en que se carece tanto de libros por lo mismo que se cultivan poco estas ciencias” (Del Río, 1819). A Del Río, no le faltaba la razón en lo referente al prejuicio de los científicos europeos: “he was likely right in his accusation of prejudice on the part of the European scientific establishment”(Caswell, 2003, p. 40).

En cambio, el reproche a Humboldt de no haberle dado al descubrimiento del eritronio la debida publicidad era esencialmente injustificado: “A su salida de México le di sin embargo una copia en francés de mis experimentos para que los publicase; si los hubiera juzgado dignos de luz pública, habrían excitado la curiosidad de los químicos, y no hubiera tardado treinta años en descubrirse el metal nuevo, que es la objeción que me hacen ahora sin culpa ninguna. Ni siquiera enseñé a Descotills copia de mis experimentos, pues como que era químico, los habría apreciado más, los hubiera repetido, y con los conocimientos que tenía del cromo que a mí me faltaban le habría sido fácil decir que era diverso metal” (Del Río, 1832b, pp 484-485; Del Río 1832c). Los documentos que describían los experimentos de Del Río se perdieron en el mar cuando (sin que él llegara a saberlo) el barco que los transportaba a Francia (Moles, 1928; Moles, 1934; Oesper, 1936; Román Polo, 1999; Weeks, 1935; Wittig, 1922) naufragó en Pernambuco (Brasil).

Humboldt de hecho nunca llegó a estar convencido completamente de la conclusión de Collet-Descotills de que el elemento en el plomo pardo era cromo. Si así hubiera sido ¿por qué enviarle una muestra de plomo pardo a Wöhler para reanalizarlo?; Whöler supo del eritronio de Del Río a través de Humboldt. Hacia 1833, un sobrino de Humboldt le indicó a Del Río, en Filadelfia, que su tío le había comentado que los cajones con las notas del análisis y algunas muestras se habían perdido en un naufragio. Con el tiempo, se atenuó el resentimiento de del Río: “*Featherston y yo atacamos con demasiada vehemencia al barón de Humboldt, y acaso sin tener culpa alguna.*” (Del Río, 1835, 1840).

Por encima de cualquier posible diferencia existente, Del Río y Humboldt eran dos sabios y se profesaban recíproca admiración (Cintas, 2004; Uribe Salas, 2008).

## **10. ANDRÉS MANUEL DEL RIO VERSUS NILS GABRIEL SEFSTRÖM: LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE FRANCIA UN LUGAR EN EL REINO**

En 1666 Jean-Baptiste Colbert/Luis XIV crean la (Royal) “Académie des Sciences”, una de las cinco hoy día pertenecientes al Instituto de Francia: 1) Française (1635); 2) des Inscriptions et Belles Lettres (1663); 3) des Sciences (1666); 4) des Beaux-Arts



(1816); 5) des Sciences Morales et Politiques (1832). La creación de las academias se enclava en el movimiento filosófico ideado por Bacon y Descartes. “Physics beware of metaphysics” comenta Newton. El poder real en Francia retira a la Universidad de París, y a las autoridades de la Iglesia, el control sobre la producción y difusión del conocimiento, para conferirlo a un organismo colocado bajo su dependencia (Martin et al., 2018).

Se crea así un espacio intelectual independiente de los antiguos poderes espirituales. Este movimiento forma parte de la etapa de secularización de la vida intelectual que se inicia en el Renacimiento, diferenciándose de esta manera las verdades científicas de las reveladas o impuestas. El acento se sitúa en la utilidad, tanto para la sociedad como para el Estado; siendo esta la razón principal de la promoción de su desarrollo. La Academia representa una élite a la que aspiran numerosos científicos (Crosland, 1978; Crosland 1992, 2002). Sus “Proceedings” tienen una amplia difusión, con un impacto nacional que representa a la ciencia francesa en el mundo. El reconocimiento que suponía ser académico tenía más importancia que el propio salario en sí mismo.

En los Comptes Rendus de l’Académie des Sciences, tomo décimo cuarto, página 574, se contempla como la Sección de Mineralogía y Geología, en la sesión celebrada el lunes 11 de abril de 1842 presenta a los candidatos que se muestran en la Tabla 13 para ocupar una plaza vacante de Académico Correspondiente, levantándose la sesión a las 5 horas.

**TABLA 13**  
**CANDIDATOS A UNA PLAZA VACANTE EN LA SECCIÓN DE MINERALOGÍA**  
**Y GEOLOGÍA - ACADEMIA DE CIENCIAS DE FRANCIA**

<i>Entre los geólogos</i>	
Jean Baptiste Julien d’Omalius d’Halloy (1783-1875)	Namur (Bélgica)
Roderick Murchison (1792-1871)	Londres (Reino Unido)
Jean de Charpentier (1786-1855)	Bex (Suiza)
Adam Sedgwick (1785-1873)	Cambridge (Reino Unido)
Henry de la Bèche (1796-1855)	Londres (Reino Unido)
George Bellas Greenough (1778-1855)	Londres (Reino Unido)
Charles Lyell (1797-1875)	Londres (Reino Unido)
<i>Entre los mineralogistas</i>	
Andrea Manuel del Río y Fernández	México
Karl Johann Bernhard Karsten (1782-1853)	Berlín (Alemania)
Georg Amadeus Carl Friedrich Naumann (1796-1873)	Freiberg (Alemania)
Joseph Jean Baptiste Xavier Fournet (1801-1869)	Lion (Francia)
Nils Gabriel Sefström (1787-1845)	Fahlum (Suecia)

En la sección del lunes 18 de abril de 1842, la Academia procede a continuación,

igualmente por la vía del escrutinio, a la nominación de un correspondiente para la Sección de Mineralogía y Geología. La lectura de la doble lista de candidatos insertados en el último *Compte rendu*, da lugar a una discusión en la cual toman parte Michel Eugéne Chevreul (1786-1889), Louis Jacques Thenard (1777-1857), Alexandre Brongniart (1770-1847), François Arago (1786-1853), Marie Jean Pierre Flourens (1794-1867) y Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850).

En el último escrutinio, siendo el número de votantes 44

M. d'Omalius d'Halloy obtiene.....	34 votos
M. Fournet.....	4
M. de Charpentier .....	2
M. Murchison.....	1
M. Andrea del Rio.....	1

con dos papeletas en blanco.

Habiendo conseguido D'OMALIUS D'HALLOY la mayoría de los votos, se declara electo. Murchison, Sedwick, de la Beche y Lyell se incorporarían también más adelante a la Académie des Sciences – Sección de Mineralogía (Potiquet, 1871) como académicos correspondientes.

En la sesión del martes 3 de mayo de 1842, la Sección de Mineralogía (tras la Sección de Mecánica) presenta la siguiente lista de candidatos para la plaza de correspondiente vacante por la muerte de Jean François d'Aubuisson de Voisins (1769-1841). D'Aubuisson había sido nombrado Correspondiente en febrero de 1821, pensándose que Pierre-Bernard de Palassou (1745-1830) había muerto. Tras comprobarse que Palassou estaba vivo, la academia permitió que d'Aubuisson conservara el puesto. Los candidatos, mostrados en la Tabla 14, eran los mismos mineralogistas que se habían presentado previamente a la plaza de la Sección de Mineralogía y Geología, levantándose la sesión a las 6 horas.

**TABLA 14**  
**CANDIDATOS A UNA PLAZA VACANTE EN LA SECCIÓN DE MINERALOGÍA - ACADEMIA DE CIENCIAS DE FRANCIA**

Andrés Manuel del Río y Fernández	México
Karl Johann Bernhard Karsten (1782-1853)	Berlín (Alemania)
Georg Amadeus Carl Friedrich Naumann (1796-1873)	Freiberg (Alemania)
Joseph Jean Baptiste Xavier Fournet (1801-1869)	Lion (Francia)
Nils Gabriel Sefström (1787-1845)	Fahlum (Suecia)

Karsten era un mineralogista alemán, Consejero Superior de Minas de Berlín, responsable del resurgimiento de la industria del zinc en Silesia, editor del *Archiv für Bergbau und Hüttenwesen* (Archivo de minería y metalurgia; 20 volúmenes, 1818-1831); y (con Ernst Heinrich Karl von Dechen) del *Archiv für Mineralogie, Geognosie,*

Bergbau und Hüttenkunde (Archivo de Mineralogía, Geognosia, Minería y Metalurgia; 26 volúmenes, 1829-1854). Naumann poseía un conocimiento enciclopédico. Sucedió a Carl Friedrich Christian Mohs (1773-1839), el creador de la escala de dureza que aún se emplea en los minerales, como profesor de Cristalografía en 1826 en Leipzig y era profesor de geognosia en Freiberg. Fournet era un geólogo y metalúrgico francés educado en la “École des Mines de Paris”, ingeniero de minas y profesor de geología en Lion. Sefström, químico sueco, uno de los discípulos más prominentes de Berzelius, redescubridor del vanadio como hemos visto, era entonces director del “Mineral Cabinet, Laboratorium Chemicum and Library of the Royal Mining College” de Estocolmo y “Appointed Member of the Royal Mining College”, Editor de “Annals of the Corporation of Ironmasters”, Miembro de la Real Academia de Ciencias Sueca desde 1815 y presidente de la misma durante el período 1840-1841.

La Academia procede en la sesión del lunes 9 de mayo de 1842 por la vía de escrutinio, a la nominación de una plaza vacante en la Sección de Mineralogía y Geología. Antes de comenzar el escrutinio, Jacques Babinet (1794-1872), matemático, físico y astrónomo hace notar que en la impresión del *Compte rendu* de la última sesión, se han dado solo los nombres de los candidatos presentados por la Sección, y que se ha olvidado incluir a Christian Samuel Weiss (1780-1856), añadido a la lista por la Academia. La mención de este hecho en el *Compte rendu* de la presente sesión reparará la omisión expuesta. A Weiss, mineralogista alemán, profesor de Mineralogía de la Universidad de Berlín en la que fue rector (1818/19 y 1832/33), se debe la creación de los parámetros de la cristalografía moderna, a la que convierte así en una rama de la ciencia matemática. En este caso, y a diferencia del anterior, no se menciona a los académicos intervinientes en las deliberaciones previas.

Antes de comenzar el escrutinio, el número de votantes era de 36

M del Río obtiene.....	23 votos
M. Fournet.....	8
M. Weiss .....	5

Habiendo obtenido M. DEL RÍO la mayoría absoluta de los votos, se declara electo. De los restantes candidatos con él presentados, Fournet sería elegido más adelante (Potiquet, 1871) académico correspondiente en 1853.

Del Río se une así al grupo selecto de científicos, elegidos, entre los que se encontró su maestro Abraham Gottlob Werner (1749-1817), profesor en la Escuela de Minas de Freiberg, enriqueciendo la nómina de académicos correspondientes selectos de la Academia de Ciencias del Instituto de Francia, a la que han pertenecido insignes descubridores de elementos químicos tales como Martin Heinrich Klaproth (1743-1817) (descubridor del uranio, zirconio, cerio y teluro), Friedrich Stromeyer (1776-1835) (descubridor del cadmio), William Hyde Wollaston (1776-1828) (descubridor del rodio y paladio), Charles Hatchett (1765-1847) (descubridor del niobio), Hans Christian Oersted (1777-1851) (descubridor del aluminio), Humphry Davy (1778-1829) (descubridor del sodio, potasio, calcio, magnesio y bario) y Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) (des-

cubridor del selenio, silicio, cerio y torio).

También han pertenecido como correspondientes otros científicos eminentes como John Dalton (1766-1844), Alexander von Humboldt (1769-1859), Michael Faraday (1791-1867), Eilhard Mitscherlich (1794-1863), Friedrich Wöhler (1800-1882), Justus von Liebig (1803-1873) o Robert Wilhelm Bunsen (1811-1889). Entra así don Andrés Manuel del Río a formar parte del imperio de los justos, de una de las instituciones más prestigiosas de su época, por elección y de entre científicos de reconocido prestigio en la esfera internacional. La dificultad de entrar en la Academia era obvia, ya que todos los científicos del mundo se disputaban un puesto. Nils Gabriel Sefström, el redescubridor del vanadio, a pesar de sus méritos notables (Sjöberg, 1951; Weeks, 1938) no pudo.

La Academia de Ciencia se dividía en dos clases: ciencias matemáticas y ciencias físicas. La primera con cinco secciones : Geometría (I), Mecánica (II), Astronomía (III), Geografía y Navegación (IV) y Física General (V); y la segunda con: Química (VI), Mineralogía (VII), Botánica (VIII), Economía Rural (IX), Anatomía y Zoología (X) y Medicina y Cirugía (XI). Un glaciar (Lamplugh, 1911) en el fiordo de Isfjorden en la isla noruega de Spitsbergen lleva el nombre de Sefström: Sefströmbreen.

## ***11. ANDRÉS MANUEL DEL RÍO, DE MÉXICO, CONSTRUCTOR DE LA CIENCIA MEXICANA***

Andrés Manuel del Río contribuyó a consolidar una cultura científica como parte del imaginario colectivo del nuevo país en construcción. Fue, en adición, un ferviente promotor del asociacionismo científico, y del intercambio de los nuevos conocimientos y problemas propios de la ciencia. Reconocía, dada su formación intelectual y experiencia acreditada la importancia que poseía para el desarrollo de las ciencias la solidez de las instituciones y los intercambios con los colegas de dentro y fuera de México (Uribe Salas, 2005). La incertidumbre y la inestable situación política que marcó la vida de México tras la guerra de la independencia hicieron mella en la institución y menguaron los esfuerzos de los gobiernos en turno para refundar el sistema educativo sobre la base de un apoyo decidido al cultivo de las ciencias, quedando las actividades relacionadas con la geología confinadas a un maltrecho Colegio de Minería y a unos cuantos exploradores geólogos extranjeros (Uribe Salas y Cortés Zavala, 2006).

Los coetáneos y discípulos de Andrés Manuel del Río -que en la segunda mitad del siglo XIX tendrían bajo su responsabilidad el control de la institucionalización de la ciencia en México – reconocieron el espíritu, la capacidad y la tenacidad con que del Río había actuado en su vida mexicana para sentar las bases del reconocimiento internacional a las aportaciones científicas que desde esta parte del planeta llevaban a cabo un grupo pequeño pero respetable de hombres de ciencia. (Uribe Salas y Cortés Zabala, 2006).

A la ímproba tarea que Andrés Manuel del Río realizó en México durante algo más de medio siglo, se unió su capacidad para crear amistades duraderas, concebir intereses comunes, impulsar la formación de redes científicas e instrumentalizar a través de publicaciones, la divulgación de los nuevos conocimientos adquiridos. En la Tabla 15 se

recoge una muestra de las sociedades científicas a las que pertenecía.

**TABLA 15**  
**SOCIEDADES CIENTIFICAS DE LAS QUE ERA MIEMBRO DEL RIO**

Real Academia Médica Matritense
Real Academia de Ciencias Naturales de Madrid
Sociedad Werneriana de Edimburgo
Real Academia de Ciencias del Instituto de Francia
Sociedad de Medicina de Estrasburgo
Sociedad Económica de Leipzig
Sociedad Linneana de Leipzig
Real Academia de Sajonia
Sociedad Filosófica de Filadelfia
Sociedad Geológica de Filadelfia (Presidente)
Liceo de Historia Natural de Nueva York
Academia de Medicina de México

## 12. COLOFÓN

“I have always been of opinion it is of greater importance to Science, that the world should concern itself more with the discoveries that are made, than with those who make them...”  
(*Del Río, 1831*)

“Nunca olvidaré –dice en una de sus obras–, una conversación que tuve en Salzburgo con un amigo alemán que conocía nuestra literatura, quién me preguntó si había en España matemáticos y físicos, -Sí, hay bastantes- ¿Y naturalistas, químicos y mineralogistas? -¡Oh! De eso hay poco. -Pues dedíquese Ud. a eso de que hay pocos, y en que puede sobresalir fácilmente, cuando para distinguirse en las matemáticas le será forzoso competir con D. Jorge Juan, le Maur, Rosell y otros. Tomé su consejo –decía del Río un año antes de morir– y me ha ido muy bien (Arnaiz y Freg, 1948, p. 27; Arnaiz y Freg, 1965, p. 197).

Jorge Juan y Santacilia (1713-1773) formó parte junto con Antonio de Ulloa y de la Torre Girard (1716-1795), ambos guardiamarinas, de la expedición de científicos que patrocinada por la Academia de Ciencias de París acudió al Virreinato de Perú para realizar la medición del grado de un arco de meridiano por debajo de la línea del ecuador. Carlos Lemaury Burriel (1724-1785) fue un ingeniero militar que trabajó en proyectos de canales navegables, y Antonio Gregorio Rosell Viciano (1748-1829), catedrático de Matemáticas de los Reales Estudios. La carrera científica de don Andrés Manuel del Río, descubridor del pancomio, eritronio, zimapanio o rionio, hoy conocido como vanadio, no quedó exenta de los avatares políticos de la época turbulenta que le tocó vivir.

Un último apunte en relación con el descubrimiento: “Si lo llamo *zimapanio*, tendré

la aprobación de Breithaupt, quien dice que es preferible el nombre del parage en que se cría un fósil al descubridor, o de cualquier otro sujeto benemérito” (Del Río, 1835, 1840). “A Berzelio le plugo más el nombre de una deidad escandinava: á haberlo yo previsto, me habría adelantado a dedicarlo a otra mexicana (menos a la de la guerra), por el mayor derecho que tenía, pues que en sus tierras se encontró primero, lo que nadie duda” (Del Río, 1835, 1840). Bargalló (1966, 1964, 1955, 1950) ha planteado a la IUPAC la conveniencia de sustituir el nombre de vanadium por el de erythronium (Jauregui, 2019).

Una vez fallecido, el gobierno mexicano dio su nombre, Andrés Manuel del Río, a un cantón del estado de Chihuahua (donde se encuentra Mineral de Batopilas), y desde 1964 la Sociedad Química de México otorga anualmente (Loyola Vargas, 2014; Rojas Hernández, 2014) el premio nacional de Química que lleva su nombre, consistente en una medalla de bronce con su efigie y una placa conmemorativa. El premio nacional de Ciencias Farmacéuticas se denomina “Dr. Leopoldo Río de la Loza (1807-1871)”, quien realizó importantes aportaciones en el ámbito de la química y la farmacia (Garritz, 2010), llegando a tomar clases de mineralogía con Andrés Manuel del Río. El año 2017 consiguió dicho premio la doctora Helgi Jung Cok. En el bicentenario de su nacimiento México honró la memoria de Andrés Manuel del Río con la emisión de un sello de correos. El magisterio de don Andrés Manuel del Río (Arnaiz y Freg, 1965) se reconoce con letras de oro a la entrada de la Escuela de Minería (Villa Román, 2019), al lado de los directores generales de Minería: Joaquín Velázquez de León, discípulo suyo, y Fausto Elhúyar (Barberena Blázquez, 1986; Pinto Cañón, 2020). El mineral  $\text{CaSr}(\text{V}_2\text{O}_6)(\text{OH})_2 \times 3\text{H}_2\text{O}$  recibe el nombre de Delrioite (Thompson y Sherwood, 1959).

Un retrato suyo se reproduce en la obra Suplemento de adiciones y correcciones a mi mineralogía (Del Río, 1832, 1848) y una estatua suya contemplarse en el Palacio de Minería (antiguo Real Seminario de Mineralogía) en la calle Guatemala nº 90. Se dispone de un óleo en la sala Fausto de Elhuyar, Escuela de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid, que es copia de un retrato original existente en el Palacio de Minería de México, traído por José Manuel López Azcona (1907-1995). Ruiz Azuara (2015, 2017) ha confeccionado un retrato de Andrés Manuel del Río para la Sociedad Química de México.

Pretender glosar la figura polihédrica y polifacética como la de Andrés Manuel del Río es como tratar de escanciar un océano en un vaso de agua. Esto ha sido tan sólo un intento. En su exilio voluntario en Filadelfia en 1832 dijo: “Conocedor por experiencia de la feliz disposición de la juventud mexicana para el estudio de esta ciencia (Orictognosia), quiero en el último tercio de mi vida consagrarle el escaso producto de mis afanes. Dichoso mil veces, si puedo ser útil a un país que he habitado treinta y cinco años, recibiendo todo género de distinciones”.

Creo, con Amado Ruiz de Nervo y Ordaz (1870-1919), que Andrés Manuel del Río y Fernández se fue en paz: “Muy cerca de mi ocaso yo te bendigo Vida,/ porque nunca me diste mi esperanza fallida,/ni trabajos injustos ni pena inmerecida;/ porque veo al final de mi rudo camino/que yo fui el arquitecto de mi propio destino...”.

He dicho

**BIBLIOGRAFÍA**

- ACADEMIE DES SCIENCES (FRANCE), Comptes Rendus Hebdomadaires des séances de l'Académie de Sciences 1842, 14 (Janvier-June).
- ACEVES, P., Estudio Introductorio a la edición facsímil de LAVOISIER, A. (1797) Tratado elemental de química, t. 1, México, Felipe Zúñiga y Ontiveros: México, UAM. Xochimilco, 1990.
- ACEVES, P., L'enseignement et l'application de la nouvelle chimie au Mexique au temps de Lavoisier. *Revue d'Histoire des Sciences* 1995, 48(1-2), 123-132.
- ACEVES, P., The First Chair of Chemistry in Mexico (1796-1810). En Petitjean, P., Jami, C., Moulin, A.M. (Eds.), *Science and Empires. Boston Studies in the Philosophy of Science*, vol 136, Springer: Dordrecht, 1992, pp 137-146.
- ACEVES PASTRANA, P., Andrés Manuel del Río y Fernández, *Real Academia de la Historia*; <https://dbe.rah.es/biografias/4339/andres-manuel-del-rio-y-fernandez>
- ACEVES PASTRANA, P., *La Química en Europa y América (siglos XVIII y XIX)*, Universidad Autónoma Metropolitana: México, 1994.
- ACEVES PASTRANA, P., La renovación de la Farmacia en la Nueva España a finales del periodo colonial. *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia (Madrid)* 2004, 70 (1), 125-145.
- ACEVES PASTRANA, P., Las ciencias vinculadas a la terapéutica en el siglo XIX mexicano. En "1898 Sanidad y Ciencia en España y Latinoamérica durante el cambio de siglo", Puerto Sarmiento, F.J., Alegre Pérez, M.E., Rey Bueno, M. (Coord.), Universidad Complutense de Madrid: Madrid, 1999; pp 17-30.
- ACEVES PASTRANA, P., Botánica, Farmacia y Química en México: Vicente Cervantes (1787-1829). En el 250 aniversario del nacimiento de Vicente Cervantes (1758-1829). *Relaciones científicas y culturales entre España y América durante la Ilustración*, Miras, T., González Bueno, Doadrio, A. (Eds.), *Real Academia Nacional de Farmacia: Madrid*, 2009; pp 101-116.
- AGUILAR CUEVAS, O., CASTRO RAMIREZ, R., ANCHEZ GARCÍA, J.J., LÓPEZ-SANDOVAL, H., BARBA-BEHRENS, N., *Química inorgánica medicinal: vanadio, platino, oro. Educación química* 2012, 23(1), 33-40.
- AGUILAR Y SANTILLAN, R., *Bibliografía geológica y minera de la República Mexicana. Boletín del Instituto Geológico de México*, 1898, 10, 101-102.
- AGUILAR Y SANTILLAN, R., *Bibliografía geológica y minera de la República Mexicana. Boletín del Instituto Geológico de México*, 1908, 17, 202-205.
- AGUILAR Y SANTILLAN, R., *El Centenario del Colegio de Minería. Memorias de la Sociedad de Alzate 1892-1893*, VI, pp. 177-242.
- ALESSIO ROBLES, V., *El ilustre maestro Andrés Manuel del Río, México (Trabajo recomendado por el Jurado del Primer Concurso de la Escuela Nacional de Ingenieros)*, 1937, 31 pp.
- AMOROS, J.L., *El error histórico de Andrés del Río, Conferencia Inaugural. Comunicaciones de las Segundas Reuniones Científicas*, Sevilla, 13-14, marzo 1980, *Sociedad Española de Mineralogía*, 1979, Volumen Extraordinario n° 2, pp 9-19.
- AMOROS, J.L., *Notas sobre la historia de la Cristalografía Mineralogía. V. La Mineralogía española en 1800: La "Origtognosia" de Andrés del Río*, *Mineralogía, Geología* 1964, 62(2), 22pp.
- ANON, *A new metal discovered. The American Journal of Science and Arts* 1831, 20 (July), 381.
- ANON, *Elementos de Orictognosia, o del conocimiento de los fósiles etc. Annales de Chimie* 1797, 21, 221-224.
- ANON, *The discovery of vanadium. The Cambridge Sentinel* 1915, 12 (40), 14 August; <https://cambridge.dlconsulting.com/?a=d&d=Sentinel19150814-01.2.9&e=-----en-20--1--txt-txIN----->
- ANON, *The oxidation States of Vanadium*; <https://people.wou.edu/~courtna/ch462/Vanadium.htm>
- ANON, *Vanadium. A new metal. Philosophical Magazine* 1838, 58 (October), 151-152.

- ANON, New Metal Vanadium. *Journal of the Royal Institution of Great Britain* 1830-1831, 1, 562.
- ARGUS MEDIA, World Energy Trade, El mercado del vanadio ve una nueva demanda en el estímulo de la UE, 25 Julio 2020; <https://www.worldenergytrade.com/metales/otros-metales/el-mercado-del-vanadio-ve-una-nueva-demanda-en-el-estimulo-de-la-ue>
- ARNAIZ Y FREG, A., D. Andrés Manuel del Río, y su ilustre magisterio en México. *Ciencia, Revista hispano-americana de Ciencias puras y aplicadas* 1965, 23(5), 196-200.
- ARNAIZ Y FREG, A., Don Andrés del Río, descubridor del Eritronio (Vanadio). *Revista de Historia de América* 1948, 25, 27-68.
- ARNAIZ Y FREG, A., Don Fausto de Elhuyart y de Zubice, *Revista de Historia de América* 1939(2) 75-96.
- ASUERO AG. Boticarios secundum artem, *ABC de Sevilla*, 07/09/2009.
- ASUERO AG. Carracido. Hombre de Ciencia. En “Academia y Humanismo: las Academias Sevillanas en la Sociedad Actual”, Instituto de Academias de Andalucía, Aula de Humanismo, 2015, pp 459-479.
- ASUERO AG. El Libro Blanco de Grado en Farmacia, ¿tierra de llegada o punto de partida? *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* 2011; 77(3): 24-32.
- ASUERO, A.G., El principio de autoridad: ejemplos extraídos en el ámbito de la química. *Memorias de la Real Academia Sevillana de Ciencias* 2015, 18, 227-243.
- ASUERO, A.G., Química (Analítica) y Principio de Autoridad: Anotaciones, Historias y Anécdotas. Lección inaugural leída en la Solemne Apertura de Curso Académico 2019-2020 en la Universidad de Sevilla, Editorial Universidad de Sevilla: Sevilla, 2019.
- ASUERO, A.G., Química y Medida: de los orígenes a la miniaturización y a la nanoanalítica (una perspectiva histórica de la química analítica). Editorial Universidad de Sevilla: Sevilla, 2022.
- ASUERO, A.G., Royal Society of Chemistry y Royal Pharmaceutical Society: Vidas paralelas. *Memorias de la Real Academia Sevillana de Ciencias* 2019, 22, 105-178.
- ASUERO, A.G., MARTIN, J., De los químicos de ciencias y los de farmacia. *Memorias de la Real Academia Sevillana de Ciencias*. 2015, 18, 245-260.
- AZUELA, L.F., GUEVARA FEDER, R., La ciencia en México en el Siglo XIX: una aproximación historiográfica. *Asclepio* 1998, 50(2), 77-101.
- A.W.H., Zur Erinnerung an Friedrich Wöhler. *Berichte* 1882 (Part 2), 15, 3127-3290.
- BARGALLO, M., Andrés Manuel del Río en el bicentenario de su nacimiento (1764). *Revista de la Sociedad Mexicana de Ciencia Natural* 1964.
- BARGALLO, M., Conveniencia de sustituir el nombre de Vandium por el de Erythronium. *Revista de la Sociedad Química de México* 1960, 4 (6), 199-200.
- BARGALLO, M., Conveniencia de sustituir el nombre de Vanadium por el de Erythronium. En Andrés Manuel del Río y du obra científica. Segundo centenario de su natalicio, Prieto, C., Sandoval Vallarta, M., Bargallo, M., Arnáiz y Freg, A. (Eds.), Compañía fundidora de Fierro y Acero de Monterrey: México, 1966, pp 11-79.
- BARGALLO, M., Homenaje a Don Andrés Manuel del Río y Fernández en ocasión del primer centenario de su muerte (1849-1949). *Ciencia, Revista hispano-americana de Ciencias puras y aplicadas* 1950, 10 (9-10), 270-278.
- BARGALLO, M., La Minería y la Metalurgia en la América Española durante la Época Colonial; con un apéndice sobre la industria del hierro de México desde la iniciación de la independencia hasta el presente, Fondo de Cultura Económica: México, 1955, pp 442.
- BARGALLO, M., La obra científica de Andrés Manuel del Río y su significado en la historia de México y de América. *Ciencia, Revista hispano-americana de Ciencias puras y aplicadas* 1965, 23(5), 193-196.
- BARBERENA BLÁSQUEZ, E., 17. Científicos europeos del siglo XIX en México: Andrés Manuel del Río y Fernández. En “Intellectual Migrations: Transcultural Contributions of European and Latin American Émigrés”, *Papers of the Thirty-First Annual Meeting of the Seminar on the Acquisition of Latin American Library Materials*, Ibero-Amerikanisches Institut Preussischer Kulturbesitz



- sitz: Berlin, Federal Republic of Germany, April 20-25, 1986; pp 188-202.
- BARRIO, D.A., ETCHEVERRY, S.B., Potential use of vanadium in therapeutics. *Current Medicinal Chemistry* 2010, 17(31), 3632-3642.
- BENNETT H. The art of the Periodic Table. *Chem World* 2019; 16(4): 24-25.
- BERZELIUS, J., Om Vanadin och dess egenskaper. *Kongliga Vetenskaps Academiens handlingar för ar 1831a*, 1-65.
- BERZELIUS, J., On vanadium. *Philosophical Magazine* 1831, 10(59), 331-337; *Philosophical Magazine* 1832 (January-July), 7-20.
- BERZELIUS, J., Sur le Vanadium et ses propriétés. *Annales de Chimie et de Physique* 1831b, 47, 337-409.
- BERZELIUS, J., Ueber das Vanadin und dessen Eigenschaften. *Neues Jahrbuch der Chemie und Physik*, 1831c, II, 323-
- BERZELIUS, J., I. Ueber das Vanadin und seine Eigenschaften. *Annalen der Physik und Chemie* 1831d, 98, 1-67.
- BERZELIUS, J., Vanadium, ein neues Metall. *Neues Jahrbuch der Chemie und Physik* 1831e, II, 121-124.
- BIERMAN, K.R., Humboldt Friedrich Wilhelm Heinrich, Alexander von. *Dictionary of Scientific Biography*, Charles Coulson Gillispie (Editor in Chief), Volume VI JEAN HACHETTE-HOSEPH HYRYL, Charles Scribners Sons: New York, 1972, pp. 549-555.
- BLONDEL-MEGRELIS M. Chimistes et pharmaciens, experts dans la société civile au XIXe siècle. *L'Actualité Chimique* 2006, 294 :60.62.
- BOWELL, R. (Ed.), *An Introduction to Vanadium: Chemistry, Occurrence and Applications*, Nova Science Publisher: New York, 2019.
- BROCK, W.H., *Historia de la Química*, Alianza Editorial: Madrid, 1998, p. 31.
- BROOKE, H.J., DEL RÍO, A., On Riolite, a supposed biseleniuret of zinc, and Herrerite, supposed to be carbonate of tellurium- by Professor del Rio. *Philosophical Magazine* 1836, 8 (January-June), 261-263.
- CARBONELL Y BRAVO F. *Elementos de Farmacia fundados en los Principios de la Química Moderna*, En la Oficina de Juan Francisco Piferrer: Barcelona, 1802; a la Real Junta Superior Gubernativa de la Facultad de Farmacia.
- CÁRDENAS-MENDEZ, J.M., RAMOS-LARA, M.P., Reformas educativas que promovieron la química en ingeniería, medicina y agricultura en la ciudad de México (siglos XVIII-XIX). *Estudios de Historia Moderna y Contemporánea de México* 2022, 63, 5-38.
- CARMONA GUZMÁN, E. *Viaje a los Confines de la Tabla Periódica. Átomos ligeros, átomos pesados y energía nuclear. Lección inaugural leída en la solemne apertura del Curso Académico 2010-2011 en la Universidad de Sevilla*. Editorial Universidad de Sevilla: Sevilla, 2010.
- CARRIÈRE, J., Berzelius und Liebig. *Ihre Briefe von 1831-1845*, Verlag von J.F. Lehmann: München und Leipzig, 1893, pp 7-9.
- CASTILLO MARTOS, M., Andrés Manuel del Río Fernández: madrileño mexicano, que descubrió el vanadio y colaboró en la independencia de México. *Archivo Histórico y Museo de la Minería AC*, 2021.
- CASTILLO MARTOS, M., *Creadores de la ciencia moderna en España y América*, Muñoz Moya Editores Extremeños: Brenes, 2005.
- CASWELL, L.R., Andrés del Río, Alexander von Humboldt, and the twice-discovered element. *Bulletin for the History of Chemistry* 2003, 28(1), 35-41.
- CASWELL, L.R., The Delhuyar brothers, tungsten, and Spanish silver. *Bulletin for the History of Chemistry* 1999, 23, 11-19.
- CHALMERS, R.A., MARR, I.L., Chemistry as a branch of analytical chemistry. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie* 1973, 263, 314-316.
- CHAMIZO, J.A., *Apuntes sobre la historia de la química en América Latina*. *Revista de la Sociedad*

- Química de México 2004, 48, 165-171.
- CINTAS, P., The road to chemical names and eponyms: discovery, priority, and credit. *Angewandte Chemie International Edition* 2004, 43, 5888-5894.
- CLARK, R.J.H., Vanadium En "The Chemistry of Vanadium, Niobium and Tantalum", Pergamon Texts in Inorganic Chemistry, Volume 20, Clark, R.J.H., Brown, D. (Eds.), Pergamon Press: Oxford, 1973; pp 491-552.
- COLLAZO-REYES, F., LUNA-MORALES, M.E., RUSSELL, J.M., PÉREZ-ANGÓN, M.A., Emergence of modern scientific discourse in the American continent: knowledge claims in the discovery of Erythronium/Vanadium in Mexico (1802-1832). *Scientometrics* 2017, 110, 1505-1521.
- COLLET-DESCOSTILS, Analyse de la mine brune de plomb de Zimapan, dans le Royaume du Mexique, envoyée par M. Humboldt, et dans laquelle M. Del Rio dit avoir découvert un nouveau métal. *Annales de Chimie* 30 Nivôse an XIII, 53, 268-271,
- COLLET-DESCOSTILS, Analyse de l'Étain en grains du Goanaxuato, au Mexique, envoyé par M. Humboldt. *Annales de Chimie* 30 Nivôse an XIII, 53, 266-271.
- COLLET-DESCOSTILS, Analyse de l'obsidienne du Mexique, envoyée par M. Humboldt. *Annales de Chimie* 30 Nivôse an XIII, 53, 260-266.
- CONACYT, Ciencia y Desarrollo. Ciencia y desmemoria en México; <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=165>
- CONSTABLE, E.C., Evolution and understanding of the d-block elements in the periodic table. *Dalton Transactions* 2019, 48(16), 9408-9421.
- CORDIER, L., Extrait d'un article de M. André Del Rio, sur la découverte du chrome dans le plomb brun de Zimapán. *Annales des Mines*, 1819, 4, 499-500.
- CRANS, D.C., YANG, L., HAASE, A., YANG, X., Health benefits of vanadium and its potential as an anticancer agent. En *Metallo-Drugs: Development and Action of Anticancer Agents*; Crans, D.C., Yang, L., Haase, A., Yang, X (Eds.), De Gruyter, 2018, pp. 251-280.
- CRANS, D.C., SMEE, J., GAIDAMAUSKAS, E., YANG, L., The chemistry and biochemistry and the biological activities exerted by vanadium compounds. *Chemical Reviews* 2004, 104, 849-902.
- CROSLAND, M. The French Academy of Sciences in the Nineteenth Century. *Minerva* 1978, 16(1), 73-102.
- CROSLAND, M. *Science under Control. The French Academy of Sciences 1795-1914*. Cambridge University Press: Cambridge, 1992, 2002.
- DAVIS, J.M., Oxidation states of vanadium. *Journal of Chemical Education* 1968, 45(7), 473-
- DE CORA, J. Bitácora de Cora. Triacastela, en la Tabla Periódica de los Elementos, *El Progreso de Lugo*, 10-X- 2019; <http://bitacoradecora.galiciae.com/?p=17173>
- DE DREMER, K., Speciation of vanadium. En "Handbook of Elemental Speciation II . Species in the Environment, Food Medicine and Occupational Health", Cornelis, R., Caruso, J., Crews, H., Heumann, K. (Eds.), Wiley: Chichester, 2005, pp. 464-487.
- DE LA QUADRA, Introducción a las Tablas Comparativas de las Substancias Metálicas. *Anales de Ciencias Naturales* 1803, 6 (16), 45-
- DEL RIO, A., A few observations on the reply of Professor Shepard. *The American Journal of Science and Arts* 1836, 30 (July), 384-387.
- DEL RIO, A., Analyse d'un alliage d'or avec du rhodium, de la Maison du Départ (Apartado) de Mexico. *Annales de Chimie et de Physique* 1825a, 29, 137-147.
- DEL RIO, A., Analysis of an alloy of gold and rhodium from the Parting House, at Mexico. *Annals of Philosophy* 1825b, 10 (July-December), 251-256.
- DEL RIO, A., Analysis of two new mineral substances, consisting of bi-seleniuret of zinc and sulphuret of mercury, found at Culebras in México. *Philosophical Magazine* 1828, 4 (July-December), 113-115.
- DEL RIO, A., Carta dirigida al Sr. Barón de Humboldt por D. Andrés del Rio, profesor de mineralogía del Real Seminario de Minería de México, y Socio corresponsal de algunas academias nacionales

- y extranjeras. *Mercurio de España*, 1819, Tomo I, 169-176.
- DEL RÍO, A., Découverte de l'iodure de mercure au Mexico. *Annales des Mines* 1829, 5, 323-324.
- DEL RÍO, A., Del Zimapanio. *El Zurriago*, Periódico científico, literario e industrial. México, Sábado 25 de Enero de 1840, Núm. 2, Tomo 1, pp 171-172.
- DEL RÍO, A., Del Zimapanio. *Revista Mexicana*, Periódico científico y literario 1835, N° 2, Tomo I, 183-185.
- DEL RIO, A., Descripción de una Piedra perlada. *Anales de Ciencias Naturales* 1803, 6 (16), 363-367.
- DEL RIO, A., Discurso de las vetas, leído en los actos del Real Seminario de Minería por D. Andrés del Río, *Gazeta de México* 1802a, 11(12), 179-192.
- DEL RIO, A., Discurso de las vetas, leído en los actos del Real Seminario de Minería por D. Andrés del Río. *Anales de Ciencias Naturales* 1804a, 7 (19), 30-48.
- DEL RIO, A., Discurso de las vetas, pronunciado por Don Andrés Manuel del Rio en los Ejercicios del Real Seminario de Minería. Suplemento a la *Gazeta de México* del Martes 18 de noviembre de 1800. *Gazeta de México* 1800, 10(28), 217-224.
- DEL RIO, A., Discurso de las vetas, pronunciado por Don Andrés Manuel del Rio en los Ejercicios del Real Seminario de Minería (Extracto del suplemento a la *gazeta de México* del martes 18 de Noviembre de 1800). *Anales de Ciencias Naturales* 1802b, 5(13), 25-38.
- DEL RIO, Discurso sobre las formaciones de las montañas de algunos Reales de minas. *Gazeta de México* 836-841; 1804b, Núm. 207, 843-846; 1804b, Núm. 208, 847-850; 881-882.
- DEL RIO, Ein paar Anmerkungen zu dem Handbuche der Mineralogie von Hoffmann, fortgesetzt von Breithaupt. *Annalen der Physik* 1822, 71, 7-12.
- DEL RIO, A., Elementos de Orictognosia o del conocimiento de los fósiles dispuestos según los principios de A.G. Werner para el uso del Real Seminario de Minería de México. Primera parte que comprende las tierras, piedras y sales, Don Mariano Joseph de Zuñiga y Ontiveros: México, 1795.
- DEL RIO, A., Elementos de Orictognosia o del conocimiento de los fósiles dispuestos según los principios de A.G. Werner para el uso del Real Seminario de Minería de México. Segunda parte que comprende combustibles, metales y rocas, Don Mariano Zuñiga y Ontiveros: México, 1805a.
- DEL RIO, A., Elementos de Orictognosia o del conocimiento de los fósiles dispuestos según los principios de A.G. Werner para el uso del Real Seminario de Minería de México (Edición facsímil) (Edición Conmemorativa del V Centenario del Descubrimiento de América), Editorial de la Universidad Complutense: Madrid, 1985.
- DEL RIO, A., Elementos de Orictognosia, Parte Práctica, 2ª ed., Imprenta de Juan F. Hurtel: Filadelfia, 1832a; Plomo Pardo, pp 483-485.
- DEL RÍO, A., Noticia de un nuevo metal. *Mercurio de España* 1805b, 2, 221-224.
- DEL RÍO, A., Nuevo Sistema Mineral del Sr. Berzelio, del año de 1825. Traducido del francés con algunas notas y adiciones por el ciudadano Andrés del Río, del Instituto Mexicano, Imprenta del Águila: México, 1827.
- DEL RIO, A., Observations on the Treatise of Mineralogy of Mr. C.U. Shepard, with the translation of "The characteristics of the classes and orders of Breithaupt". *Transactions of the Geological Society of Pennsylvania* 1834a, 1(1), 113-136.
- DEL RÍO, A., On the conversion of sulphuret of silver into native silver, after the method of Becquerel. *Transactions of the Geological Society of Pennsylvania* 1834b, 1(1), 137-138.
- DEL RIO, A., On the crystals developed in Vermiculite by Heat, Read before the American Philosophical Society November 1<sup>st</sup>, 1833. *Transactions of the American Philosophical Society* 1837, 5, 137-138.
- DEL RIO, Silver ores reduced by the method of Becquerel. *The Edinburgh Journal of Science* 1831, 5(10), 222-224; *Transactions of the American Philosophical Society* 1834, 4, 60-62.
- DEL RÍO, A.M., Sobre el primer descubrimiento del cromo en el plomo pardo de Zimapán. *Gaceta de*

- México de 11 de septiembre de 1811.
- DEL RIO, A., Suplemento de adiciones y correcciones de mi Mineralogía impresa en Filadelfia en 1832, 1848.
- DEL RIO, A., The brown lead ore of Zimapán. *Monthly American Journal of Geology and Natural Science* 1(1), 1831, 438-444.
- DICCIONARIO UNIVERSAL de Historia y de Geografía, Tomo Sexto, Imprenta de F. Escalante/ Librería de Andrade: México, 1855; RIO (ANDRES MANUEL DEL), pp 618-619.
- DIDALOPEZ, Des de la Mediterrània. Els empèdocles moderns – Andrés Manuel del Río (1801) i l'element 23 (V) – vanadi (nilbitri, Nbt) 03/07/2014; <https://desdelamediterrania.cat/2014/07/03/els-empedocles-moderns-andres-manuel-del-rio-1801-i-lelement-23-v-vanadi-nilbitri-nbt/>
- DOMINGUEZ MARTINEZ, R., De la Física en el Colegio de Minería a la creación del Instituto de Física de la UNAM. En “La institucionalización de las Disciplinas Científicas en México. Siglos XVIII, XIX y XX: estudios de caso y metodología, Kleiche-Dray, M., Zubieta García, J., Rodríguez-Sala, M.L.(Coords.), Institut de recherche pour le développement : México, 2013; pp 197-224.
- EDITOR, New metal, provisionally called vanadium. Extract of a Letter from M. Berzelius to M. Dulong, read before the Academy of Natural Sciences at Paris, Feb. 7, 1831. *Monthly American Journal of Geology and Natural Science* 1831, 1(1), 67-69.
- EDITOR, Scientific notices. *Annals of Philosophy* 1826, 11 (January to June), 464-470.
- ELGUERO, J., España y los elementos de la tabla periódica. *Anales de Química* 2007, 103, 70-76.
- ENGHAG, P., *Encyclopedia of the Elements, Technical Data, History, Processing, Applications*, Wiley-VCH: Weinheim, 2004, 1243 pp; Vanadium, pp 535-547.
- ESCAMILLA GONZÁLEZ, F.O., MORELOS RODRIGUEZ, L., Andrés Manuel del Río's (1764-1849) Translation of Langsdorf's *Hydraulik*, Freiberg, 1790. *Berichte der Geologischen Bundesanstalt* 2013, 101; 2. Internationales Erbe Symposium Das kulturelle Erbe in den Geowissenschaften, Bergbau und Metallurgie Bibliotheken, Archive, Sammlungen Beiträge / Kurzfassungen30. September - 4. Oktober 2013, Bozen.
- ESCAMILLA-GONZALEZ, F.O., Bringing Werner's teaching to the New World: Andrés Manuel del Río and the Chair of Mineralogy in the Scholl of Mines of Mexico (1795-1805). *Early Sciences History* 2020, 39(2), 246-261.
- ESCAMILLA GONZÁLEZ, F.O., MORELOS RODRÍGUEZ, L., Escuelas de Minas Mexicanas 225 Años del Real Seminario de Minería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): México, 2017.
- FEATHERSTONHAUGH, G.W., Translation of a letter from Professor del Rio. *Monthly American Journal of Geology and Natural Science* 1831, 1(1), 69-70.
- FERNANDEZ BRAVO, R.R., De los malacates y socavones a la máquina de vapor. Las bombas hidráulicas para el desagüe de minas movidas por agua y por bestias, diseñadas por Andrés del Río y Fausto de Elhuyart, 1800-1819. Tesis de licenciatura en Historia, Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM: México, 2008.
- FERNANDEZ-GARCÍA, M.I., GÓMEZ-FÓRNEAS, E., RODRÍGUEZ-SILVA, L., ROUCO, L., Legado español á táboa periódica. *Boletín das Ciencias* 2019, 87, 73-84.
- FLORES CLAIR, E., Minería, educación y Sociedad. *El Colegio de Minería 1774-1821*, México, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2000, 239 pp.
- FONTANI, M., COSTA, M., ORNA, M.V., The Lost Elements, The Periodic Table's Shadow Side, Oxford University Press: Oxford, 2014; I.2.2. Erythronium, panchromium, or vanadium, pp 14-17.
- FORTOUL, T.I., ROJAS-LEMUS, V., RODRIGUEZ-LARA, A., ..., GONZÁLEZ-RENDON, S.E., MONTAÑO, L.F., ALTAMIRO-LOZANO, M., Overview of environmental and occupational vanadium exposure and associated health outcomes. *Journal of Immunotoxicology* 2014, 11(1), 13-18.
- FOURCROY, A.F., *Système des connaissances chimiques et de leurs applications aux phénomènes de la nature et de l'art*, Tome V, Section Vi, Art 5. Du Chrome et de son acide, Baudouin: Paris,

- 1802 ; p. 107.
- FRAQUEZA, G., AURELIANO, M., Polyoxovanadates contribution to pharmacological, antimicrobial and toxicological actions of vanadium. *Medical Sciences Forum* 2022, 11, 8 (4 pp).
- GAMBINO, D., New trends on vanadium chemistry, biochemistry, and medicinal chemistry. *Inorganics* 2022, 10, 68 (3 pp).
- GARCÍA BRAVO, M.H., Transmisión de conocimientos técnico-científicos entre Europa y la Nueva España en relación con el sector minero (1760-1820). *Actas del Congreso organizado por la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, salón de actos del Cabildo Insular, La Gomera, 2 y 4 abril de 2009* [https://fundacionorotava.org/media/web/files/page163\\_\\_03\\_Haydee\\_Garcia.pdf](https://fundacionorotava.org/media/web/files/page163__03_Haydee_Garcia.pdf)
- GARRITZ, A., Leopoldo Río de la Loza (1807-1876). En “200 Emprendedores Mexicanos. La Construcción de una Nación”, Vázquez Semadoni, M.E. (Coord.), LID Editorial Mexicana, 2010, pp 193-199.
- GAY LUSSAC, Biographical account of Hippolyte-Victor Collet-Descostils. *Annals of Philosophy* 1817, 9 (January to June), 417-421.
- GAY LUSSAC, Notice sur Hippolyte-Victor Collet-Descostils. *Annales de Chimie et de Physique* 1817, 4, 213-220
- GEOLOGICAL SOCIETY, Transactions of the Geological Society of Pennsylvania Vol I, Part I 1834, List of officers for the year 1834.
- GILLISPIE, C.G. Scientific aspects of the French Egyptian Expedition 1798-1801. *Proceedings of the American Philosophical Society* 1989, 133, 447-474.
- GLICK, T.F., Science and independence in Latin America (with special reference to New Granada). *The Hispanic American Historical Review* 1991, 71(2), 307-334.
- GONZALEZ DOMINGUEZ, M.R., Ordenanzas de la Minería de la Nueva España formadas y propuestas por su Real Tribunal, Universidad Complutense: Madrid, 1984.
- GONZALEZ VERGARA, E., El vanadio: un elemento muy mexicano. *Saberes Ciencia* 2019, N° 93; 2019/11/11; <https://saberesyciencias.com.mx/2019/11/11/vanadio-elemento-mexicano/>
- GRANJA CASTRO, D.M., Kant en el México del siglo XIX: la recepción e influencia de su filosofía. *Signos Históricas* 2010, 23, 8-61.
- GREENWOOD, N.N., Vanadium to dubnium: from confusion through clarity to complexity. *Catalysis Today* 2003, 78, 5-11.
- GUEVARA GARCÍA, J.A., Una semblanza de la química bioinorgánica del vanadio. *Educación química* 1996, 7(4), 185-189.
- GUMMOW, B. Vanadium as an Essential Trace Element and Therapeutic Agent, En *Encyclopedia of Environmental Health*, Vol. 6, 2nd ed., 2011
- GUMMOW, B., Vanadium: environmental pollution and health effects. En: *Encyclopedia of Environmental Health*; Nriagu, J.O. (Ed.), Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2011, pp 626-636.
- GUSTAFSSON, J.P., Vanadium geochemistry in the biogeosphere -speciation, solid-solution interactions, and ecotoxicity. *Applied Geochemistry* 2019, 102, 1-25.
- GUTIERREZ, R., Ilustración española y pragmatismo americano. El fracaso del proyecto europeo en la minería americana. En “La Plata en Iberoamérica, siglos XVI al XIX”, Paniagua Pérez, J., Salazar Simarro, N. (Coords.), Congreso Internacional, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Universidad de León: México, 2008, pp 99-128.
- HABALA, L., VALENTOVÁ, J., Metal complexes in medicine and pharmacy -the past and the present I. *Česka a Slovenska Farmacie* 2018, 67(5-6), 182-191.
- HABALA, L., VALENTOVÁ, J., Metal complexes in medicine and pharmacy -the past and the present II. *Česka a Slovenska Farmacie* 2020, 69(1), 3-16.
- HABALA, L., VALENTOVÁ, J., Metal complexes in medicine and pharmacy -the past and the present III. *Česka a Slovenska Farmacie* 2020, 69(3), 121-129.
- HABEKOST, A., Vanadium redox Flow batteries with different electrodes and membranes. *World*

- Journal of Chemical Education 2018, 6(1), 8-13.
- HANUS-FAJERSKA, E., WISZNIEWSKA, A., KAMINSKA, I., A dual role of vanadium in environmental systems – beneficial and detrimental effects on terrestrial plants and humans. *Plants* 2021, 10, 1110 (14 pp).
- HELIODORO VALLE, R., Químicos mexicanos. *Historia Mexicana* 1954, 4(1), 115-123.
- HERNANDEZ LUNA, J., Don Andrés del Río y el primer libro de filosofía kantiana que hubo en México. *Filosofía y Letras* 1944, 15, 11-16.
- HINRICHS, G.D., The atomic weight of vanadium determined by the laboratory work of eighty years. *Proceedings of the American Philosophical Society* 1911, 199 (May-Aug), 191-216.
- HOLSER, W.T., Río, Andrés Manuel del, *Dictionary of Scientific Biography*, Charles Coulson Gillispie, Editor in Chief, Volume 11 A. PITCAIRN-B. RUSH, Charles Scribner's Sons: Nes York, 1975, pp 464-465.
- HUMBOLDT, A., Correspondance. Alexandre Humboldt et le citoyen Bompland, à l'Institut national de France. *Annales du Muséum National d'Histoire Naturelle* 1804a, 3, 396-404.
- HUMBOLDT, A., Ensayo político sobre la Nueva España, Tomo I, Jules Renouard : Paris, 1827, Cap VII, p. 237.
- HUMBOLDT, A., Ensayo político sobre la Nueva España, Tomo III, Jules Renouard : Paris, 1827, Cap XI, p. 117.
- HUMBOLDT, A., Notizen von seinen physikalischen Beobachtungen in Peru und Mexiko. *Annalen der Physik (Gilbert's Ann.)* 1804b, 18, 118-125.
- HUMBOLDT, A., *Researches concerning the Institution & Monuments of the Ancient Inhabitants of America* (translated into English by Jelen Maria Williams), Vol. II, Longman : London, 1814.
- HUMBOLDT, A., Vermischte geologisch mineralogische und chemische Notizen. *Neues allgemeines Journal der Chemie* 1804c, 691-696.
- JAGNAUX, R., *Histoire de la Chimie*, Tome Second, Baudry et Cie: Paris, 1891; Chapitre XI, Vanadium – Niobium – Tantale – Molybdène – Tungstène, pp 341-345.
- JOHNSTON, J.F.W, First Meeting of the British Association for the Advancement of Science, held at York in September 1831. *The Edinburgh Journal of Science* 1831a, 5 (April-October)
- JOHNSTON, J.F.W., On the discovery of vanadium in Scotland, and on the vanadate of lead, a new mineral species. *The Edinburgh Journal of Science* 1831b, 5 (April-October), 166-168.
- JOHNSTON, J.F.W., Some notices regarding Vanadium. *The Edinburgh Journal of Science* 1831c, 5(April-October), 318-323.
- JAUREGUI, J.A.C., Conveniencia de sustituir el nombre de vanadium por el de erythronium. *Naturaleza y Tecnología* 2019, 6(1), 49-52.
- KARSTEN, D.L.G., *Tablas Mineralógicas dispuestas según los descubrimientos más recientes e ilustradas con notas*, 3ª ed. alemana de 1800, traducida al castellano por Don Andrés Manuel del Río.
- KIRSOP, A., Metals in Medicine: Vanadium, *Frontiers*; <https://frontiersmagazine.org/post-11/>
- KLEIN, U., Apothecary-chemists in eighteen-century Germany. En "New Narratives in Eighteen-Century Chemistry", Principe, L.M. (ed.), *Archimedes New Studies in The History and Philosophy of Science and Technology*, vol. 18, Springer: Dordrecht, 2007; pp 97-137.
- KLEIN U. Not a pure science: chemistry in the 18th and 19th century. *Science* 2004; 306 (5698): 981-982.
- KORBECKI, J., BARANOWSKA-BOSIACKA, I., GUTOWSKA, I., CHLUBEK, D., Biochemical and medical importance of vanadium compounds. *Acta Biochemical Polonica* 2012, 59(2) 195-200.
- KUSTIN, K., PESSOA, J.C., CRANS, D.C., Vanadium: the versatile metal, *ACS Symposium Series* 974, American Chemical Society: Washington, DC, 2007, pp 448.
- KUZVART, M., BÖHMER, M., *Prospecting and exploration of mineral deposits*, 2<sup>nd</sup> ed., Elsevier: Amsterdam, 1986, p.11.

- LAISSUS, Y., *L'Égypte, une aventure savant 1798-1801*, Librairie Arthème Fayard: Paris, 1998.
- LAMPLUGH, C.W., On the shelly moraine of the Sefström glacier and other Spitsbergen phenomena illustrative of British glacial conditions. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society* 1911, 17, 216-241.
- LANGESLAY, R., KAPHAN, D.M., MARSHALL, L., STAIR, P.C., SATTELBERGER, A.P., DEL-FERRO, M., Catalytic applications of vanadium: a mechanistic perspective. *Chemical Reviews* 2019, 119(4), 2128-2191.
- LEMERY N., *Curso Chymico*, Edición preparada por Albert Soriano I Blasco, Indico: Barcelona, 2002.
- LENNARTSON, A., The colours of chromium. *Nature Chemistry* 2014, 6, 942.
- LESPINASSE R, BONNARDT F (Eds). *Les métiers et corporations de la ville de Paris: XIII<sup>e</sup> siècle. Le livre des métiers d'Etienne Boileau*, Imprimerie Nationale: Paris, 1879.
- LEYVA RAMOS, E., Investigación y docencia en Universidades de México. El premio de la AQM en educación en química Andrés Manuel del Río. *Boletín de la Sociedad de Química de México* 2014, 8(3), 16-17.
- LIGTENBARG, A.G. J. Vanadium and Iron Complexes for Catalytic Oxidations, University of Groningen, 2001; Chapter 1, Introduction, pp 1-15.
- LONG, J.R., Preparation of vanadium metal, PhD Thesis, Iowa State College, 1951.
- LOPEZ DE AZCONA, J.M., Un madrileño ilustre: Andrés Manuel del Río y Fernández (1764-1849). Tirada aparte de los Anales del Instituto de Estudios Madrileños, 1979 Tomo 16, 1-12.
- LOPEZ GONZALEZ, J.D., Influencia Española en el Desarrollo de la Metalurgia en Hispanoamérica. IV Congreso de las Academias Andaluzas, Sevilla, Écija, 17, 18 y 19 de Octubre, 1985; 16 pp.
- LOPEZ HERNANDEZ, S., El vanadio, recuento del proceso de desarrollo científico. *Revista de Salud Pública* 2019, 23(3), 92-104.
- LOURENSSEN, K., WILLIAMS, J., AHMADPOUR, F., CLEMMER, R., TASNIM, S., Vanadium redox Flow batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage* 2019, 25, 100844 (10 pp).
- LOYOLA VARGAS, V.M., El Premio Nacional de Química "Andrés Manuel del Río" 50 años después de haber sido establecido por la Sociedad Química de México. *Boletín de la Sociedad Química de México* 2014, 8(3), 18-23.
- MARKS, S., Vanadium, Niobium, and Tantalum, Volume VI. Part III, A text-book of Inorganic Chemistry, Friend, J.N. (Ed.), Charles Griffin: London, 1929, pp 12-13.
- MARSHALL, J., MARSHALL, V.R., Rediscovery of the elements. The second Discovery of vanadium. *The Hexagon* Fall 2004a, 46-50.
- MARSHALL, J., MARSHALL, V.R., Rediscovery of the elements. The Undiscovery of vanadium. *The Hexagon*, Summer 2004b, 24-28.
- MARSHALL, J., MARSHALL, V.R., Rediscovery of the elements. Vanadium. *The Hexagon*, Winter 2003, 60-62, 65.
- MARTIN, J., ASUERO, A.G., SÁEZ-PLAZA, P., Química (Analítica) y Farmacia en los orígenes de las Academias y Sociedades Científicas: Francia, Inglaterra y Hungría como ejemplos. *Memorias de la Real Academia Sevillana de Ciencias* 2018, 21, 163-217.
- MARTIN, J., SÁEZ PLAZA, P., ASUERO, A.G., La Farmacia en la Sección de Químicas de la Real Academia de Ciencias de Francia (1666-1793). *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* 2019, 85(2), 153-166.
- MARTINEZ, J.R., José Mariano, el desconocido hombre de ciencia, *Cuadernos Potosinos de Cultura Científica* 2008, 1(2), 19-32.
- MARTINEZ GORDILLO, G., Vanadio, el elemento mexicano. *El Heraldo de Juárez*, 30 de marzo de 2021; <https://www.pressreader.com/mexico/el-heraldo-de-juarez/20210320/282020445062236>
- MATEOS VEGA, M., CAMACHO, F., Reúnen ciencia y arte en "una gran obra de diplomacia artístico-científica de México. *La Jornada* 2022-08-04; <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/08/04/>

- cultura/reunen-ciencia-y-arte-en-una-gran-obra-de-diplomacia-artistico-cientifica-de-mexico/  
MATHARAN, G.A., La constitución de la química como disciplina en Argentina, México y Colombia: un estudio comparado. Educación química 2016, 27, 67-73.
- MEMORIAS DE LA SOCIEDAD CIENTÍFICA Antonio Alzate, Tomo II, Imprenta del Gobierno en el ExArzobispado: México, 1888-1889, p. 303, p. 313.
- MERINO, G., FERNÁNDEZ-HERRERA, M.A., SOLER-ILLIA, G.J.A.A. et al., Introduction to celebrating Latin American talent in chemistry. RSC Advances 2021, 11 (63), 40216-40219.
- MINING ACADEMIES, The American Journal of Education and College Review 1870, 21, 80 (Instruction in Mines and Metallurgy); 314-318 (The Mining Academy of Freiberg).
- MISKOWIEC, P., Name game: the naming history of the chemical elements: part 2 – turbulent nineteenth century. Foundations of Chemistry 2022; <https://doi.org/10.1007/s10698-022-09451-w>
- MOISSAN, H., Le Fluor et ses composés, G. Steinheil: Paris, 1900, p. viii.
- MOLES, E., El momento científico español 1775-1825. Discurso leído en el acto de su recepción por E. Moles y contestación de B. Cabrera el día 28 de marzo de 1934. Academia de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales, Madrid, 1934.
- MOLES, E., Wolframio, no tungsteno, Vanadio o Eritronio, Anales de Química (Madrid) 1928, 16, 234-252.
- MORALES COSME, A.D., VIESLA-TREVIÑO, C.V., Farmacéuticos en transición. Academia y Farmacia en México de 1833 a 1865. Revista Médica del Instituto Mexicano de la Seguridad Social 2016, 54(1), 6-105.
- MORALES MOYA, A., La ideología de la Ilustración española. Revista de Estudios Políticos 1988, 59(1), 65-105.
- MORELOS RODRÍGUEZ, L., La Sociedad Geológica Mexicana en sus primeros años (1904-1912). Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 2022, 74(1), A301121 (57 pp).
- MORENO, R., La ciencia de la ilustración mexicana, Anuario de Estudios Americanos 1975, 32, 25-41.
- MUKHERJEE, B., PATRA, B., MAHAPATRA, S., BANERJEE, P., TIWARI, A., CHATTERJEE, M., Vanadium – an element of atypical biological significance. Toxicology Letters 2004, 150, 135-143.
- NASETTI S. Il Lato Oscuro de Marte. Dal Mito Alla Colonizzazione, Libro digitale, ISBN 8458227173495.
- NICKLES, J.M., Geological Literature on North America 1785-1918. Part I. Bibliography, Government Printing Office: Washington, 1923, p. 878.
- NIETO CODINA, A., Alejandro de Humboldt y Andrés Manuel del Río. Encuentros y desencuentros en la ciencia de Nueva España. Espacio, Tiempo y Forma, Serie VI, Geografía, 2018, 11, 337-348.
- OCKEN, U., Die Entdeckung der Chemischen Elemente und die Etymologie ihrer Namen, Verlag, 2017.
- OELLEN, W., The art of wondering makes life worth living. Science made alive. Vanadium oxidation states; <https://woelen.homescience.net/science/index.html>
- OESPER, R.E., Enrique Moles (1883- ). Journal of Chemical Education 1936, 12(8), 368.
- ORTEGA VARELA, Andrés Manuel del Río y el descubrimiento del vanadio. Archipiélago. Revista de pensamiento y debate cultural UMSNH 2010, 9 (14), 15-17.
- PANETH, F.A., Nature August 2, 1947, 160, 164.
- PARMENTIER, F., Vanadium. En “Encyclopédie Chimique. Tome III – Métaux, 8° Cahier, Molybdène, Vanadium et Titane, Freymy, M. (Dir.), Dunod : Paris, 1886, pp 69-154.
- PEARCE WILLIAMS, L., Oersted, Hans Christian, Dictionary of Scientific Biography, Charles Coulson Gillispie (Editor in Chief) Volume X, S.G. NAVASHIN-W. PISO, Charles Scribners Sons: New York 1974, pp 182-186.
- PELAYO, F, REBOK, S., Un discípulo español de Alexander von Humboldt en la *Bergakademie* de Freiberg. Josef Ricarte y su informe sobre el método de amalgamación de Born (1788). Asclepio 2004, 56, 87-111.
- PELLÓN GONZÁLEZ, I., De los dioses a los hombres: un recorrido histórico de los descubrimientos



- de los elementos químicos. *Estudios Geológicos* 2014, 70(2), e015 (17pp).
- PÉREZ SÁENZ DE URTURI, J.E., La minería colonial americana bajo la dominación española. *Boletín Millares Carlo* 1985, 7-8, 53-120.
- PESSOA, J.C., ETCHEVERRY, S., GAMBINO, D., Vanadium compounds in medicine. *Coordination Chemistry Reviews* 2015, 301-302, 24-48.
- PINTO, G., Del Río, descubridor del eritronio hoy vanadio. *ConCIENCIAS digital* 2021, 26, 5-25.
- PINTO CAÑÓN, G., Iniciativas del Ayuntamiento de Madrid para resaltar la labor de Andrés Manuel del Río, el madrileño que descubrió el vanadio. *Anales de Química* 2020, 116(1), 38-42.
- PINTO CAÑÓN, G., El retablo de la Independencia: obra de arte mexicana donde se homenajea a Andrés Manuel del Río y Fausto Delhuyart. *Educación química* 2022, 33(4), 143-155.
- PINTO CAÑÓN, G., Andrés Manuel del Río: el polifacético madrileño que descubrió un elemento químico en México; Naukas, ciencia, escepticismo y humor; <https://naukas.com/2020/06/22/andres-manuel-del-rio-el-polifacetico-madrileno-que-descubrio-un-elemento-quimico-en-mexico/>
- POLIAKOFF, M., RANG, S., The periodic table : icon and inspiration. *Philosophical Transactions R. Soc. A* 2015, 373 : 20140211.
- POLO CONDE, F., LÓPEZ CANCIO, J.A., Los saberes químicos en España desde el siglo XVI hasta principios del siglo XX. *Afinidad* 1987, 44 (411), 367-371.
- PORTELA, E., Andrés Manuel del Río, químico y geólogo. *Boletín Informativo Fundación Juan March* 1986, 165, 3-12.
- PORTELA, E., SOLER, A., La química española del siglo XIX, *Ayer* 1992, 85-197.
- POTIQUET, A., L'Institut National de France. Ses divers organisations, ses membres, ses associés et ses correspondants, 20 Novembre 1795-19 Novembre 1869, Didier: Paris, 1871.
- PRASAD, K.S., RAMACHANDRAPPA, S.U., Potential medicinal applications of vanadium and its coordination compounds in current research prospects: a review. *Current Bioactive Compounds* 2020, 16(3), 201-209.
- PRIDEAUX, J., Experiments on Vanadate of Ammonia, and on some other compounds of Vanadium. *Philosophical Magazine* 1831 (July-December), 309-314.
- PRIETO, C., Palabras preliminares en el homenaje a del Río. *Ciencia, Revista hispano-americana de Ciencias puras y aplicadas* 1965, 23(5), 189-191.
- PRIETO, C., SANDOVAL-VALERTA, M., BARGALLO, M., ARNAIZ Y FREIG, A., Andrés Manuel del Río y su obra científica: segundo centenario de su natalicia, *Compañía Fundadora de Fierro y Acero de Monterrey*, 1966.
- PUCHE RIART, O., Andrés Manuel del Río, *Biblioteca Virtual de Polígrafos, Fundación Ignacio Larramendi: Madrid*, 2017, 90 pp.
- PUCHE RIART, O., AYALA CARCEDO, F.J., La "Orythología" de Juan José Elhúyar (1754-1796) y la "Oritognosia" de Andrés Manuel del Río (1764-1849), primeros tratados geológicos escritos por españoles en América. *Boletín geológico y minero* 1993, 104(1), 72-108.
- PUERTO SARMIENTO FJ. La alegría de enseñar y la farmacia. *Lección inaugural del Curso Académico 2008-2009, Universidad Complutense: Madrid*.
- RAMÍREZ, S., Biografía del Sr. D. Andrés Manuel del Río. *Boletín de la Sociedad de Geografía y Estadística, Cuarta Época, Tomo II, 1891a*, 56, 204-232.
- RAMÍREZ, S., Biografía del Sr. D. Andrés Manuel del Río, *Primer Catedrático de Mineralogía del Colegio de Minería, Imprenta del Sagrado Corazón de Jesús: México, 1891b*.
- RAMÍREZ, S., Datos para la Historia del Colegio de Minería recogidos y recopilados bajo la forma de Efemérides. Edición de la Sociedad "Alzate", *Imprenta del Gobierno Federal en el Exarzobispado: México, 1890*.
- RAMÍREZ-SAGAÓN, D.M. BÁEZ, J.E., OSCAR, C., JIMENEZ-HALLA, J.O.C., La historia del descubrimiento del vanadio (elemento 23). *Naturaleza y Tecnología* 2019a, 6(2), 32-38.
- RAMÍREZ-SAGAÓN, D.M. BÁEZ, J.E., OSCAR, C., JIMENEZ-HALLA, J.O.C., Reconocimiento del quehacer científico en la América del siglo XIX. La validación del descubrimiento del vanadio

- en Europa. *Naturaleza y Tecnología* 2019b, 6(3), 21-27.
- RAMOS LARA, M.P. Intercambio de ideas científicas y técnicas en la formación de los ingenieros de minas mexicanos antes, durante y después de la independencia. *Actas del Congreso Internacional*”, XV Encuentro de Latinoamericanistas Españoles, Trama Editorial: Madrid, 2012, pp 1152-1156.
- REALES ORDENANZAS para la Dirección, Régimen y Gobierno del Importante Cuerpo de la Minería de Nueva España y de su Real Tribunal General de Orden de su Magestad, Madrid, 1783.
- REHDER, D., *Bioinorganic Vanadium Chemistry*, Chap. 1 Introduction and Background, Wiley: New York, 2008, pp 1-11.
- REHDER, D., Implications of vanadium in technical applications and pharmaceutical issues. *Inorganica Chimica Acta* 2017, 455(Part 2), 378-389.
- REHDER, D., The future of/for vanadium. *Dalton Transactions* 2013, 42, 11749-11761.
- REHDER, D., The potentiality of vanadium in medicinal applications. *Future Medicinal Chemistry* 2012, 4(14), 1823-1837.
- REHDER, D., The potentiality of vanadium in medicinal applications. *Inorganica Chimica Acta* 2020a, 504, 119445
- REHDER, D., The role of vanadium in biology. *Metallomics* 2015, 7, 730-742.
- REHDER, D., Vanadium: biological, environmental, and engineering aspects. *Advances in Chemical Research* 2020b, 2 (1), 17 pp.
- REHDER, D., Vanadium in health issues. *ChemTexts* 2018, 4, 20
- REHDER, D., Vanadium. Its Role for Human. En *Interrelations between Essential Metal Ions and Human Diseases, Metal Ions in Life Sciences* 13, Sigel, A., Sigel, H., Sigel, R.K.O. (Eds.), Springer Science: Dordrecht, 2013, Cap. 5, pp. 139-168.
- RIVERA, A., *La Filosofía en la Nueva España*, Tipografía de Vicente Veloz a cargo de A. López Arce: Lagos, 1885, pp 237-238, 242.
- ROBIQUET, Extrait du Procès Verbal, Séance du 9 mars 1831. Présidence de M. Lodinert. *Société de Pharmacie de Paris. Journal de Pharmacie et des Sciences Accessoires*, 1831, 17, 213-219.
- RODRIGUEZ, C., El eritronio, la historia del elemento químico que se descubrió en México, *De Reporteros*, 19 de febrero de 2019; <https://dereporteros.com/2019/02/19/eritronio-la-historia-del-elemento-quimico-se-descubrio-mexico/>
- RODRIGUEZ MERCADO, J., ALTAMIRO-LOZANO, M., Vanadio: contaminación, metabolismo y genotoxicidad. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 2006, 173-189.
- RODRIGUEZ MOURELO, J., El descubrimiento del vanadio. *La Ilustración española y americana* 1892, 26(36), 206-207.
- ROGERS, K., The 100 Most Influential Scientists of All Time, *The Britannica Guide to the World's Most Influential People*, Britannica Educational Publishing in association with Rosen Educational Services: New York, 2010; Alexander von Humboldt, pp 129-134.
- ROJAS HERNÁNDEZ, A. Representaciones gráficas de sistemas multicomponentes y multirreaccionantes: el método de especies y equilibrios generalizados. *Boletín de la Sociedad Química de México* 2014, 8(3), 23-29.
- ROMÁN POLO, P., Elementos químicos descubiertos por españoles. *Anales de Química* 1999, 95(1), 28-33.
- ROMERO, L., El eritronio antecedente del vanadio. Aportación hispano mexicana a la Tabla periódica. *GACETA UNAN* 2019, N° 5029, 18 de febrero de 2019, p. 7; <http://acervo.gaceta.unam.mx/index.php/gum10/issue/view/5253/showToc>
- ROSCOE, H.E., I. The Bakerian Lecture. *Researches on vanadium. Philosophical Transactions* 1868, 158, 1-27.
- ROSCOE, H.E., XVIII. *Researches on vanadium. Part II. Philosophical Transactions* 1869, 159, 679-692.
- ROSCOE, H.E., XVIII. *Researches on vanadium. Part III. Philosophical Transactions* 1870, 160, 317-

331.

- ROTH, E., Highlights in the history of analytical chemistry in France. En *Euroanalysis VI*, Editions de Physique les Ullis France: Paris, 1968, pp 1-27.
- ROUELLE GF. Cours de Pharmacie, manuscrit en 1, volume in 40, p. 4.
- ROYAL SOCIETY OF LONDON, Catalogue of Scientific Papers (1860-1863), Vol V, Cambridge University Press: Cambridge, 1871; pp 210-211.
- RUIZ AZUARA, P., Don Andrés Manuel del Río 2015; <https://www.pilarruizazuara.com/retrato-a-m-del-rio>
- RUIZ AZUARA, P., Don Andrés Manuel del Río: relato del camino seguido para pintar su retrato. *Boletín de la Sociedad Química de México* 11-2 m, 2017, 24-26; <http://bsqm.org.mx/pdf-boletines/V11/V11N2/>
- SAEZ PLAZA, P., ASUERO, A.G., MARTIN, J., De la antigua historia de los métodos iodométricos : de los inicios a Robert Bunsen. *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* 2018, 84(3), 276-288.
- SAEZ PLAZA, P., MARTIN, J., ASUERO, A.G., El descubrimiento de los halógenos ¿Química o Farmacia ? (1ª Parte). *Memorias de la Real Academia Sevillana de Ciencias* 2017a, 20, 161-183.
- SAEZ PLAZA, P., MARTIN, J., ASUERO, A.G., El descubrimiento de los halógenos ¿Química o Farmacia ? (2ª Parte): iodo. *Memorias de la Real Academia Sevillana de Ciencias* 2017b, 20, 185-220.
- SAEZ PLAZA, P., MARTIN, J., ASUERO, A.G., El descubrimiento de los halógenos ¿Química o Farmacia ? (3ª Parte): Bromo, Triadas y Flúor. *Memorias de la Real Academia Sevillana de Ciencias* 2017c, 20, 221-261.
- SANCHEZ-DIAZ, G., Los orígenes de la industria siderúrgica mexicana. *Continuidades y cambios tecnológicos en el siglo XIX. Revista de Estudios Históricos* 2009, N° 50, 11-60.
- SANCHEZ-LARA, E., El vanadio: desde su descubrimiento hasta su papel en la vida. *Educación química* 2020, 31(4), 9-20.
- SANCHEZ RON, J.M., Andrés del Río o la conquista del pasado, 20-01-202; [https://www.elespanol.com/el-cultural/ciencia/20220120/andres-manuel-rio-conquista-pasado/642186078\\_0.html](https://www.elespanol.com/el-cultural/ciencia/20220120/andres-manuel-rio-conquista-pasado/642186078_0.html)
- SANDOVAL VALLARTA, M., El descubrimiento del vanadio. *Ciencia, Revista hispano-americana de Ciencias puras y aplicadas* 1965, 23(5), 192-193.
- SANDOVAL VALLARTA, M., ARNAIZ Y FREG, A., The name of element 23. *Nature* 1947, 160, 163-164.
- SCALBERGE, F. Jardin du Roy pour la culture des plantes médicinales, 1636, dessin, Paris, bibliothèque de l'Arsenal.
- SCANCAR, J., MILACIR, R., A critical overview of Cr speciation analysis based on the high performance liquid chromatography and spectrometric techniques. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 2014, 29, 427-433.
- SCIELO, Implicaciones de Scielo en la historia de la cobertura de la ciencia de ALyC; <https://blog.scielo.org/es/2018/10/24/implicaciones-de-scielo-en-la-historia-de-la-cobertura-de-la-ciencia-de-alyc/#.Y-mQhy3FQWo>
- SEFSTRÖM, N.G, A new metal, Vanadium, associated with Iron. *The Journal of The Royal Institution of Great Britain* 1830-1831, 1, 625-626.
- SEFSTRÖM, N.G., Om Vanadium, en ny Metall, funnen uti stangjern, som är till-verkad af malm ifran Taberget i Smaland. *Kongl. Vetenskaps-Academiens Handlingar för år 1830*.
- SEFSTRÖM, N.G., Sur le Vanadium, métal Nouveau, trouvé dans du fer en barres de Eckersholm, forge qui tire sa mine de Taberg, dans le Smaland. *Annales de Chimie et de Physique* 1831, 46 (1), 105-111
- SEFSTRÖM, N.G., Ueber das Vanadin, ein neues Metall, gefunden im Stangeneisen von Eckersholm; einer Eisenhütte, die ihr Erz von Taberg in Smaland bezieht. *Annalen der Physik und Chemie (Poggendorff)* 1831, 21, 43-49.
- SEFSTRÖM, N.G., Vanadium. 1. Ueber das Vanadium, ein neues Metall, aufgefunden in Stangeneisen, welches aus Erzen von Taberg in Smaland dargestellt worden. *Neues Jahrbuch der Chemie*

- und Physik 1831, II, 316-323.
- SELVARAJ, S, KRISHNAN, U.M., Vanadium-Flavonoid complexes: a promising class of molecules for therapeutic applications. *Journal of Medicinal Chemistry* 2021, 64(17), 12435
- SENOZAN, N.M., Vanadium in the living world. *Journal of Chemical Education* 1974, 51(8), 503.
- SHAEFALDDIN, A.A., AL-YOUNIS, I.M., MOHAMMED, H.H....ALASMAEL, N., LACHOWICZ, J.L., ENWAS, A-H., Therapeutic properties of vanadium complexes. *Inorganics* 2022, 10, 244 (20 pp).
- SHEPARD, C.U., Rejoinder of Prof. Shepard to Prof. del Rio. *The American Journal of Science and Arts* 1837, 31 (January), 13-134.
- SHEPARD, C.U. Reply to "Observations on the Treatise of Mineralogy of Mr. C.U. Shepard, by Andrés del Río, Professor of Mineralogy in the Schools of Mines of Mexico. *American Journal of Science and Arts* 1835, 27, 312-325.
- SHORE, A., FRITSCH, A., HEIM, M., SCHUH, A., THOENNESSEN, M., Discovery of the vanadium isotopes. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 2010, 96(4), 351-357.
- SIMANDI, G.J., PARADIS, S., Vanadium as a critical material: economic geology with emphasis on market and the main deposit types. *Applied Earth Science* 2022, 131(4), 218-236.
- SIMON, J., Pharmacy and chemistry in the eighteen century: What lesson for the history of science? *Osiris* 2014, 29 (1), 283-297.
- SJÖBERG, S.G., Nils Gabriel Sefström and the discovery of vanadium. *Journal of Chemical Education* 1951, 28(6), 294-296.
- SOLA DE LOS SANTOS, J., Enseñanza de la Física y la Química. Educación secundaria/ Orígenes/ El origen del nombre del vanadio; <http://www.heurema.com/Origenes/Origenes33-V/V.pdf>
- STRAUSS, J., The discovery of the elements. Vanadium. *Journal of Chemical Education* 1932, 1657-1658.
- SUPE TULCAN, R.X., OUYANG, W., LIN, C., HE, M., WANG, B., Vanadium pollution and health risk in marine ecosystems: anthropogenic sources over natural contributions. *Water Research* 2017, 207, 117938.
- T.E.T., Berzelius and Wöhler, *Nature* 1902, 67(1725), 49-50.
- TELE MUNDO; El secreto del vanadio: un metal bastante desconocido con el potencial de cambiar las energías renovables, 02-07-2021; <https://www.teledoce.com/telemundo/ciencia-y-tecnologia/el-secreto-del-vanadio-un-metal-bastante-desconocido-con-el-potencial-de-cambiar-las-energias-renovables/>
- TENORIO, R., Recognition slow for man behind Mexico's sole periodic table discovery, *Mexico News Daily*, July 15, 2021; <https://mexiconewsdaily.com/mexicolife/man-behind-mexicos-periodic-table-discovery/>
- THOMSON, R.D. History and analysis of vanadate of lead. *Records of General Science* 1835, 1 (Jan.), 34-45.
- THOMPSON, M.E., SHERWOOD, A.M. Delrioite, a new calcium strontium vanadate from Colorado. *The American Mineralogist* 1959, 44, 261.
- THORPE, E., *A Dictionary of Applied Chemistry*, Vol. 7, Longman: Calcutta, 1927, p. 293.
- TORALES PACHECO, M.C., Apuntes para el estudio de la presencia de la Ilustración Alemana en México. *Anuario de la Historia de América Latina (JbLA)* 2003, 40, 123-150.
- TREVIÑO, S., DIAZ, A., SÁNCHEZ-LARA, E., SANCHEZ-GAYTAN, B., PEREZ-AGUILAR, J.M., GONZÁLEZ-VERGARA, Vanadium in biological action: chemical, pharmacological aspects, and metabolic implications in diabetes mellitus. *Biological Trace Element Research* 2019, 188, 69-98.
- TRÍFONOV, D.N., TRÍFONOV, V.D., Como fueron descubiertos los Elementos Químicos, Editorial MIR, Moscú, 1990.
- URDANG G. History of Pharmacy as an academic discipline. *J Hist Med* 1948; 3(1): 5-10.
- URIBE SALAS, A., Alexander von Humboldt en Nueva España y el Real Seminario de Minería de México. En "Alexander von Humboldt. Estancia en España y el viaje americano, Cuesta Domingo, M., Rebok, S. (Coords.), Real Sociedad Geográfica y Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 2010, 11-12.

- ficas: Madrid, 2008, pp 111-126.
- URIBE SALAS, J.A., Andrés Manuel del Río: formación científica y desempeño académico en el Real Seminario de Minería de México. *Ciencia Nicolaita* 2007, 46, 5-28.
- URIBE SALAS, J.A., Aportaciones tecnológicas de Andrés del Río en la era de la revolución industrial. En *Cultura Latinoamericana* Vol. III, Guisela Gonzales y Mauro Mamami (Eds.), Grupo Pakarima: Lima (Perú), 2016, pp 125-138.
- URIBE SALAS, J.A., Ciencia y filosofía. Dos facetas en la vida de Andrés Manuel del Río. *Saberes, Revista de historia de las ciencias y las humanidades* 2018, 1(3), 20 pp.
- URIBE SALAS, J.A., De la aclimatación de la mineralogía al desarrollo de la geología o la promoción de conocimientos para el desarrollo de México, Siglo XIX. En . *Naturaleza y Laboratorio*; Calvo, L., Girón, A., Puig-Samper (Eds.), *Residència d'Investigadors, CSIC-Generalitat de Catalunya*, Barcelona, 2013, 117-142.
- URIBE-SALAS, J.A., Exchange and technological innovation in the work of Andrés Manuel del Río. *De Re Metallica* 2015, 24, 45-55.
- URIBE-SALAS, J.A., Historia del Vanadio, 1801-1831. Disputa por la autoría del descubrimiento. *Asclepio* 2020, 72(2), 322 (13 pp).
- URIBE-SALAS, J.A., Intencionalidad y destino en la historia de la ciencia. *Letras Históricas* 2021, 24, 183-202.
- URIBE-SALAS, J.A., Labor de Andrés Manuel del Río en México: profesor en el Real Seminario de Minería e innovador tecnológico en minas y ferrerías. *Asclepio* 2006, 58(2), 231-260.
- URIBE SALAS, J.A., CORTÉS ZAVALA, M.T., Andrés del Río, Antonio del Castillo y José G. Aguilera en el desarrollo de la ciencia mexicana del Siglo XIX. *Revista de Indias* 2006, 56 (237), 491-518.
- URIBE SALAS, J.A., CORTÉS ZAVALA, M.T., Tres hombres de ciencia en la constitución del objeto geológico en México. *Brazilian Journal of Latin American Studies* 2014, 13(25), 117-135.
- VALDIVIA MORENO, L., Ciencias de la Tierra en México (1846-1906). Teoría y Práctica Científica. Tesis para obtener el Grado de Maestra en Historia con Opción en Historia Regional Continental, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, 2013.
- VALERA CANDEL, M., Proyección internacional de la ciencia ilustrada española: catálogo de la producción científica española publicada en el extranjero: 1751-1830, Servicio de Publicaciones, Universidad de Murcia, 2006, pp. 176-177.
- VANADIUM, *Bulletin of the Pan American Union* 1915, 40(4), 465-476.
- VEGA Y ORTEGA, R., Medicina, farmacia y química en el Centenario de la República Mexicana, 1911. *Boletín Americanista* 2013, 63 (2), n° 67, 183-203.
- VELAZQUEZ DE LEON, Elogio fúnebre del Sr. D. Andrés del Río. *Álbum Mexicano*, Tomo II, 1849, 219-224.
- VILAR, R., Vanadio. *Educación química* 2003, 14(2), 117-119.
- VILLA ROMAN, El elemento químico descubierto en México. *El Universal* 16/03/2019; <https://www.eluniversal.com.mx/mochilazo-en-el-tiempo/el-elemento-quimico-descubierto-en-mexico>
- WANG, S-G., SCHWARZ, E. Icon of chemistry : the periodic system of chemical elements in the new century. *Angewandte Chemie International Edition* 2009, 48(19), 3405-3415.
- WATT, J.A.J., BURKE, I.T., EDWARDS, R.A.,..., ROSE, N.L., TURNER, S.D., SPEARS, B.M., Vanadium: a reemerging environmental hazard. *Environmental Science and Technology* 2018, 52 (21), 11973-11974.
- WEBER, A.Z., MENCH, M.M., MEYERS, J.P., ROSS, P.N., GOSTICK, J.T., LIU, Q., Redox flow batteries: a review. *Journal of Applied Electrochemistry* 2011, 41(10), 1137-1164.
- WEEKS, M.E., 15. Contributions of Andrés Manuel del Río, pp 391-405, Presented before the Division of History of Chemistry at the Cleveland meeting of the A.C.S., Sept. 11, 1934.
- WEEKS, M.E., Discovery of the elements, *Journal of Chemical Education*: Easton, Pa., 1956.
- WEEKS, M.E., The discovery of the elements. VII. Columbium, tantalum, and vanadium. *J. Chem.*

- Educ. 1932a, 9 (5), 863-884.
- WEEKS, M.E., The discovery of the elements. Vanadium. *Journal of Chemical Education* 1932b, 9 (9), 1658-659.
- WEEKS, M.E., The scientific contributions of Don Andrés Manuel del Río. *Journal of Chemical Education* 1935, 12 (4), 161-166.
- WEEKS, M.E., Nils Gabriel Sefström – the sesquicentennial of his birth. *Isis* 1938, 29(1), 49-57.
- WIKIMONDE, Hyppolyte-Victor Collet-Descotils; [https://wikimonde.com/article/Hippolyte-Victor\\_Collet-Descotils](https://wikimonde.com/article/Hippolyte-Victor_Collet-Descotils)
- WIKIPEDIA, Hyppolyte-Victor Collet-Descotils; [https://en.wikipedia.org/wiki/Hippolyte-Victor\\_Collet-Descotils](https://en.wikipedia.org/wiki/Hippolyte-Victor_Collet-Descotils)
- WITTICH, E., El descubrimiento del vanadio. *Boletín Minero de México* 1922, 13, 4-15.
- WITTICH, E.; “Zur Entdeckungsgeschichte des Elementes Vanadium”, *Technik Industrie und Schweizer Chemiker Zeitung* 16, 4-5, (Jan. 31, 1933); *Forschungen und Fortschritte* 1933, 9, 38-39.
- WURTZ, *Dictionnaire de Chimie Pure et appliquée*, Tome Troisième, S-Z, Librairie Hachette : Paris, 1882, p. 628.
- YANES, J., La fiebre del vanadio el nuevo ‘oro verde’, 1 Julio 2021; <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/medioambiente/la-fiebre-del-vanadio/>

***ENTREGA DE LOS PREMIOS  
A INVESTIGADORES JÓVENES  
CORRESPONDINETES AL AÑO 2019***

*Acto celebrado en el salón de actos  
de la Real Maestranza de Caballería de Sevilla,  
el día 26 de mayo de 2022*





***DISCURSO DE ANTONIO FRANCONETTI GARCÍA,  
PREMIO A INVESTIGADORES JÓVENES “REAL  
ACADEMIA SEVILLANA DE CIENCIAS” CONVOCATORIA  
DE 2019***

Excelentísimo señor teniente de hermano mayor de la Real Maestranza de Caballería de Sevilla, excelentísimo señor presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, ilustrísimo señor fiscal de la Real Maestranza de Caballería. Excelentísimas e ilustrísimas autoridades, excelentísimos e ilustrísimos maestrantes, señoras y señores.

Me sumo a mis compañeros en dar las gracias tanto a la Real Academia Sevillana de Ciencias como a la Real Maestranza de Caballería de Sevilla por la concesión de este premio de jóvenes investigadores, además, en este entorno tan increíble. Es un auténtico orgullo y una satisfacción que se reconozca mi trayectoria investigadora en la que considero que es mi casa, Sevilla. Además, este premio es un aliciente para seguir trabajando día a día, seguir innovando y buscando nuevos retos en los que seguir desarrollándose. En este momento, me gustaría dar las gracias: Cuando uno empieza la carrera investigadora, lo primero que debe hacer es incorporarse a un grupo de investigación y, como grupo, trabajas como un equipo en busca de un objetivo común. Con este grupo de investigación, maduras como persona y como científico. Con ellos compartes tanto decepciones como alegrías. Es por eso, que este éxito también les pertenece. Podría nombrar todas las personas que han pasado por mi vida científica y seguro que se me olvidaría alguien. Por ello, simplemente quiero decir agradezco a todas las personas que han contribuido a mi carrera investigadora tanto en Sevilla como en Barcelona, en la Universidad de las Islas Baleares, donde me encontraba cuando solicité este premio, y ahora en el centro CIC bioGUNE, en Bilbao, donde actualmente desarrollo mi línea de investigación. En estos momentos, no sólo me acuerdo de los investigadores. Al final, la investigación es vocación. Vocación entendida como que los mencionados éxitos y llamémosles fracasos (o decepciones) derivados de tu trabajo, afectan a tu vida personal. Como todo en la vida, tiene que existir un equilibrio entre tu vida personal y laboral. Es por ello, que tengo que agradecer fundamentalmente a mi familia y a mis amigos porque sin ellos no podría haber llegado hasta este momento.

Por último, les doy la enhorabuena a los otros premiados el día de hoy, tanto Gonzalo como Alberto.

Brevemente, voy a explicar mi trayectoria, por la que se me concede este premio. La concesión del premio establece que se me otorga por la “química supramolecular”. Pero esta palabra puede ser un poco difícil de entender (incluso ambigua) para los que no

trabajan en este ámbito. Si algo caracteriza a la química supramolecular es que engloba prácticamente a todas las materias tanto de la química, la biología e incluso puede que incluso parte de la física. La química supramolecular se puede definir como la química más allá de las moléculas. Es decir, cuando dos o más moléculas se asocian mediante interacciones intermoleculares. Un claro ejemplo de esto es el agua. Una molécula de agua no tendría las propiedades que posee porque, de hecho, no sería líquida. Tampoco su punto de ebullición sería 100°. Es la asociación de muchas moléculas de agua mediante fuerzas intermoleculares la que permite la vida.

La línea de investigación en la que trabajo consiste en estudiar estas interacciones intermoleculares, pasando desde moléculas simples a sistemas biológicos, que es lo que estoy desarrollando en bioGUNE. Concretamente, estudiamos el reconocimiento molecular de carbohidratos. Los carbohidratos son ampliamente conocidos por todos debido a su papel estructural o fuente de energía, pero la realidad es que están en todas las partes de nuestra vida. Por ejemplo, los antígenos que determinan nuestro grupo sanguíneo, de tipo A o B, son carbohidratos. La mayoría de las proteínas que tenemos tienen una “envoltura” de carbohidratos. Un virus o, simplemente, una respuesta inmune celular se produce porque se han reconocido estos carbohidratos. Por tanto, empleando síntesis (química), utilizando resonancia magnética nuclear y también la biología molecular intentamos entender estas interacciones. Es una forma de aplicar herramientas químicas, podríamos decir “fundamentales”, a la sociedad. Esto es lo que actualmente estoy trabajando en Bilbao con un contrato Juan de la Cierva, al menos, durante los próximos dos años. Aunque espero en algún momento poder volver a Sevilla. Me encantaría. Por mi parte, nada más; simplemente dar de nuevo las gracias. Y repetir que este premio es un aliciente para todos los jóvenes investigadores. Anima a seguir trabajando cada día. Muchas gracias a todos.

---

## ***DR. D. ALBERTO JIMÉNEZ SOLANO***

Excelentísimo señor presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, excelentísimo señor teniente de hermano mayor de la Real Maestranza de Caballería de Sevilla, ilustrísimo señor fiscal de la Real Maestranza de Caballería de Sevilla, excelentísimos e ilustrísimos caballeros y damas maestrantes, colegas, amigos y familiares, señoras.

No estoy acostumbrado a enfrentarme a una audiencia sin el respaldo de una pantalla cargada de imágenes o una pizarra llena de fórmulas. He pasado algunas horas preguntándome que podría decir en este momento. Intentaré expresar en pocas palabras todo mi agradecimiento.

Estoy realmente emocionado por ser reconocido por la Academia y la Real Maestranza. Es por esto por lo que quisiera empezar estas palabras de agradecimiento hacia ambas instituciones, por fomentar el conocimiento en detalle y su divulgación en esta difícil época de inmediatez y conocimiento superficial. Agradezco el esfuerzo de ambas instituciones, tangible hoy en este acto.

En segundo lugar, quisiera expresar mi más sincera felicitación a los otros dos premiados. Los doctores Antonio Franconetti y Gonzalo Millán.

Este momento me permite agradecer públicamente el esfuerzo y el apoyo de todas las personas e instituciones que han hecho posible que pueda estar hoy recibiendo este reconocimiento. En particular, quiero hacer una mención especial los grupos de investigación a los que he pertenecido, y que en el fondo aún pertenezco, durante estos años: al grupo de Materiales Ópticos Multifuncionales de Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla liderado por el Prof. Hernán Míguez, al grupo de Nanoquímica del Instituto Max Planck para la Investigación del Estado Sólido liderado por la Prof. Bettina Lotsch y al grupo de Simulación de Sistemas físicos de la Universidad de Córdoba liderado por el Prof. Antonio Sarsa. Agradezco además a todas las instituciones públicas y privadas que han financiado nuestra investigación durante todos estos años.

Por supuesto, hago extenso este agradecimiento a mis directores de tesis, el Prof. Hernán Míguez y el Dr. Juan Galisteo.

Es mi trabajo cumplir lo que considero los tres objetivos fundamentales de las universidades y los centros de investigación: la investigación científica y técnica, la transferencia del conocimiento y la formación. Por esto agradezco en este punto a todas las personas que hacen esto posible: investigadores y formadores en cualquier nivel educativo y entorno.

En referencia a la transferencia del conocimiento científico y tecnológico, quizá la forma más tangible de revertir a la sociedad el esfuerzo que hace con su financiación materializado en soluciones al servicio de la sociedad. Mi homenaje a todos los científicos y tecnólogos que diseminan sus trabajos en forma de patentes, tejiendo de esta manera el desarrollo de un sistema de innovación sólido y de referencia.

Antes de despedirme, dedico este premio a las mujeres: investigadoras, tecnólogas y docentes que forman y formarán parte del futuro, de nuestro Futuro. Estoy convencido que detrás de estos tres premiados hay una larga lista de mujeres que han hecho hoy esto posible. Ellas son hoy nuestras verdaderas protagonistas.

Termino así con la parte más personal, agradezco a mi familia, a mis padres y hermanos, a Laura y a Candela, las auténticas merecedoras de este premio.

Muchas gracias

---

## ***PALABRAS DEL PRESIDENTE DE LA REAL ACADEMIA SEVILLANA DE CIENCIAS, EL EXCMO. SR. D. JOSÉ LUIS DE JUSTO ALPAÑÉS***

Excmo. Sr. teniente de hermano mayor, Ilmo. Sr. fiscal, Excmas. e Ilmas. autoridades, caballeros y damas maestrantes, compañeros académicos, premiados, Sras. y Sres.

La Real Maestranza de Caballería de Sevilla fue fundada en el año 1670, y se reorganizó en 1725, siendo Felipe I de Parma, hermano de Carlos III, su primer hermano mayor. A partir de 1823 su hermano mayor es el rey de España.

Muy pronto inicia sus actividades de mecenas. En 1965 comienza a conceder premios a los mejores expedientes universitarios.

En cierta ocasión aplaudimos a un pianista en un bar donde nadie lo hacía. El pianista, agradecido, dijo: “Gracias, el aplauso es la comida del músico”. El investigador también necesita estímulos, entre ellos el recibir algún premio por su trabajo. En 1989 se instauraron los Premios para Jóvenes Investigadores de la Real Maestranza de Caballería y de la Real Academia Sevillana de Ciencias, que vinieron a llenar esta necesidad. Al principio fueron dos premios, que, a partir de 1995 se ampliaron a tres. Con los del día de hoy se han adjudicado 86 premios para investigadores jóvenes.

El teniente de hermano mayor, D. Santiago León y Domecq, ha sido reelegido en su cargo en 2021, y nuestras relaciones siguen siendo igual de fluidas.

Sólo recientemente se han comenzado a convocar otros premios de investigación por parte de la cadena SER, la Universidad de Sevilla (de carácter internacional y para premiar un determinado trabajo), los del CIC Cartuja, restringidos a Química, Biología y Ciencia de Materiales, el Ayuntamiento de Sevilla (sólo para mujeres, no necesariamente jóvenes y con jurado feminista), los premios de medio ambiente, sin limitación de edad y los de la Real Academia de Medicina. Son bienvenidos. Los premios de la Real Maestranza y la RASC, y los del CIC Cartuja son los únicos para jóvenes investigadores (hasta ahora sin llegar a los 35 años para los primeros y 31 años para los segundos) y pensamos que estas son las edades en que son más útiles los premios. Las cuantías de estos dos premios, además, no son superadas por las de otros premios sevillanos.

El anterior teniente de hermano mayor, D. Javier Benjumea, manifestó en cierta ocasión que la calidad de los premios no viene dictada por su cuantía, aunque la cuantía de estos premios no es superada por ninguno de los otros, sino por la calidad del jurado y por la trayectoria de los premiados.

El jurado ha estado siempre formado por un vocal por cada sección de la Real Academia Sevillana de Ciencias y presidido por el presidente de la Academia. En cuanto

a la calidad del jurado, sólo diré que hay académicos que han sido galardonados con el Premio Príncipe de Asturias o con los premios Jaime I, que han formado parte del jurado.

En todos los casos la actuación del jurado que otorga los premios ha sido impecable, eligiendo a los que el jurado creía que eran los mejores, y una prueba de ello está en la brillante trayectoria que posteriormente han seguido los premiados. Así, entre los 86 premiados hasta ahora hay, como mínimo, 21 catedráticos de universidad, entre ellos el rector y vicerrector de investigación de la Universidad de Sevilla, profesores de investigación del CSIC, etc.

La proporción de mujeres premiadas crece, a partir de 1997 de modo lineal hasta llegar al 22,1% acumulativo en el año actual. Pero si contamos el porcentaje de mujeres desde la convocatoria de 2006, en lugar de hacerlo desde 1989, el porcentaje alcanzado en la convocatoria de 2018 es del 33,3 %. Si lo hacemos desde 2010, este porcentaje alcanza el 36,7%. Estas cifras reflejan la realidad de la investigación de calidad en España, donde hasta 1994 la participación de la mujer era pequeña, y a partir de esta fecha se produce una explosión en la investigación de calidad femenina para alcanzar en 2019 cifras más esperanzadoras, pero que todavía no son las que me gustaría a mí. La mujer, quizá por ese don que tiene de su participación fundamental en la gestación de la vida, sigue teniendo más problemas que el hombre para destacar en investigación. Sin embargo, no creo que la solución sea convocar premios sólo para mujeres con jurado feminista, como ocurre con uno de los premios citados anteriormente.

Si ahora miramos el número de premiados, dividido por el número de candidatas (presentados a los premios), vemos que este número es más bajo para la sección de Tecnología.

En el año del 30 aniversario se han podido mantener el número de premios y su cuantía (ahora 6000 €) lo que es un logro en tiempos de crisis para las dos instituciones que los patrocinan. Ambas han sufrido la crisis, pero han sido capaces de mantener los premios; en el caso de la Real Academia Sevillana de Ciencias mediante una aportación por parte de la mayor parte de los académicos numerarios cuyo objetivo es la concesión de este premio. Hemos de decir que nuestra Academia consiguió inaugurar su sede, en un acto presidido por el rector de la Universidad de Sevilla, su gran promotor, el 5 de diciembre de 2018.

Este año los premios han sido concedidos a Alberto Jiménez Solano, que se podría encuadrar en la sección de Física, por sus investigaciones sobre el estado sólido, enfocada al uso de la nanofotónica para el desarrollo de nuevos sensores y dispositivos de almacenamiento de energía, a Gonzalo Millán Zambrano, que se podría encuadrar en la sección de Biología, por sus estudios en torno a cómo la creatinina regula los procesos que tienen lugar en el ADN y a Antonio Franconetti García, que se podría encuadrar en la sección de Química, por sus investigaciones en torno a la química supramolecular.

Este año finaliza el período de celebraciones con motivo del quinto centenario de la primera circunnavegación a la Tierra. Se trata de una gesta única que requiere una adecuada conmemoración. No es casualidad que España, con un capitán portugués, fuese el primer país que circunnavegase la tierra. Esto se debe a que, en aquellos años, España y

---

Portugal lideraban el mundo en cartografía, tecnología de la navegación y cosmografía. En el año 2019 apareció un libro auspiciado por el Instituto de Academias de Andalucía y en el que intervienen las Academias Sevillanas de Buenas letras y de Ciencias sobre la Primera Circunnavegación, de título “Primera Circunnavegación del Globo”. En el año 2017 publiqué mi primer artículo sobre este tema, en una época en que parecía que estaba dormido. Afortunadamente, ahora, las personas más cualificadas, le prestan la atención que se merece.

La Real Academia Sevillana de Ciencias quiere agradecer a la Real Maestranza de Caballería la confianza depositada en ella, al cederle la elección del jurado y respetar todas sus decisiones. También quiere agradecer su generosidad, por la concesión de los dos premios que llevan el nombre de Real Maestranza de Caballería. La Real Maestranza de Caballería de Sevilla se ha convertido en un gran mecenas de la cultura y de la ciencia en nuestra ciudad, que invierte sus ingresos en actividades taurinas, premios Fin de Carrera a los mejores expedientes y premios científicos. Y, durante los tiempos de crisis, ha mantenido estas funciones. La brillantez del acto de entrega de premios en la casa de la Real Maestranza, de Aníbal González, con introducción musical a cargo de la soprano Diana Larios y el pianista Claudio Gómez, con un brillante repertorio, y a la que asiste lo más selecto de la sociedad sevillana, nos hace recordar a los príncipes del Renacimiento que ejercieron una labor semejante. Pero, en nuestros días, la Real Maestranza de Caballería integra una nobleza que está apartada de sus privilegios de antaño y que no busca más reconocimiento que los que les proporciona su dedicación altruista. Por todos estos motivos, la Real Academia otorgó a la Real Maestranza de Caballería la Medalla de Honor de la corporación, que le fue entregada el 12 de noviembre de 2002 en el salón de actos de la Real Academia de Bellas Artes de Santa Isabel de Hungría. Felicitaciones a los premiados y agradecimiento a los asistentes.

