



com CIENCIAS.digital

Revista de divulgación científica de la Facultad de Ciencias de Zaragoza

divulgacionciencias.unizar.es/revistas/web/revistas/revista/18

Nº 18 NOVIEMBRE 2016



LA
CIENCIA
Y EL
TODO

Redacción

DIRECCIÓN:

- Ana Isabel Elduque Palomo

SUBDIRECCIÓN:

- Concepción Aldea Chagoyen

DISEÑO GRÁFICO Y MAQUETACIÓN:

- Víctor Sola Martínez

COMISIÓN DE PUBLICACIÓN:

- Blanca Bauluz Lázaro
- Ángel Francés Román
- Cristina García Yebra
- Luis Teodoro Oriol Langa
- María Luisa Sarsa Sarsa
- María Antonia Zapata Abad

Edita

Facultad de Ciencias,
Universidad de Zaragoza.
Plaza San Francisco, s/n
50009 Zaragoza

e-mail: web.ciencias@unizar.es

IMPRESIÓN: GAMBÓN Gráfico, Zaragoza.

DEPÓSITO LEGAL: Z-1942-08

ISSN: 1888-7848 (Ed. impresa)

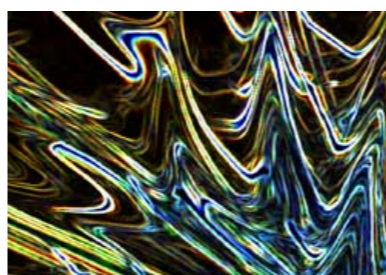
ISSN: 1989-0559 (Ed. digital)

Imágenes: fuentes citadas en pie de foto.

Portada: a2ua.com y static.pexels.com

La revista no comparte necesariamente las opiniones de los artículos firmados y entrevistas.

Editorial	2
La Química a través del espejo Fernando Gomollón-Bel	4
Riadas del Ebro: comprenderlas sin miedo Javier del Valle	14
Átomos y moléculas de cristal Martín Martínez-Ripoll	24
El Paleomagnetismo y el viejo geólogo Gonzalo Pardo, Francisco Javier Pérez y Concepción Arenas	36
Dieta Mediterránea y Salud Pública Isabel Mauriz Turrado y José Manuel Martínez Pérez	50
Matemáticas en los bolsillos: los dígitos de control Mariano Gasca	66
La RSME en Aragón Pedro J. Miana	76
Noticias y actividades	88



La CIENCIA y el TODO

Este número constituye alcanzar la mágica cifra de dieciocho publicaciones. Una cifra que, curiosamente, a pesar de no pertenecer a ese grupo de lo que todos llamamos números redondos, constituye en la sociedad occidental la barrera entre la tutela y la plenitud de derechos. No cumplimos dieciocho años, pero sí dieciocho números, que nos parecen toda una singladura a todos los que iniciamos esta tarea hace algunos años.

“No cumplimos dieciocho años, pero sí dieciocho números, que nos parecen toda una singladura a todos los que iniciamos esta tarea hace algunos años”.

Con este nuevo número volvemos a reiterar nuestra voluntad integradora. La Ciencia puede ayudar a casi todas las actividades humanas, y digo casi porque no quiero que se me tache de pretenciosa. Pero en el título no he podido resistir la tentación.

Divulgación por todos los lados, eso es lo que vas a encontrar, querido lector.

Química en una buena dosis. Las moléculas, a pesar de ser muy pequeñas, tienen lados, aunque los científicos la llamemos simetría. Y que esa pequeña molécula sea de una u otra forma afecta, y de qué manera, a su comportamiento. Fernando Gomollón nos lo cuenta. Pero, además de lados, las moléculas se ordenan y forman unas formas geométricas de extremada belleza e inimaginable importancia. Los cristales son puentes desde el mundo molecular

hasta el macroscópico y es la cristalografía la ciencia que nos enseña a transitar por él, como bien nos cuenta Martín Martínez-Ripoll.

Somos lo que comemos, oímos muchas veces. Y, en los países mediterráneos, llevamos ya tiempo estudiando y fomentando la forma de alimentarnos usando los productos que nuestro entorno nos proporciona. Dieta mediterránea lo llamamos y su relación con la salud pública nos la introduce Isabel Mauriz y José Manuel Martínez.

La Geología es una ciencia que se caracteriza por algo totalmente ajeno al resto de los saberes: la medida del tiempo sigue otra escala. Lo viejo y lo nuevo, en Geología, tienen otro significado. Por eso, los geólogos llaman paleo a aquello que ya no está, pero estuvo, y dejó su huella indeleble en el registro geológico. Gonzalo Pardo, Francisco Javier Pérez y Concha Arenas nos lo cuentan. No os lo perdáis.

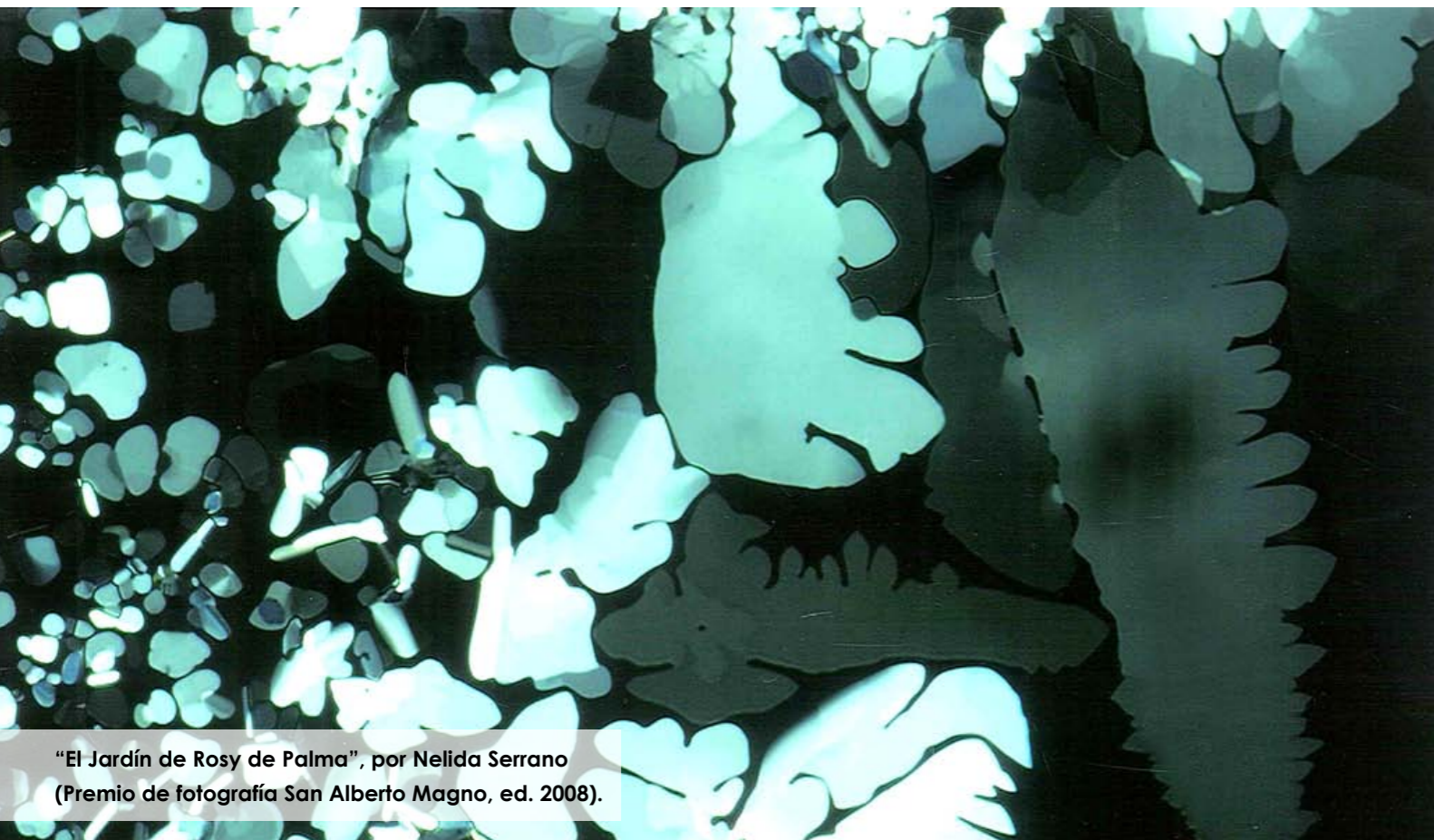
Aragón está conformado desde su origen por nuestro padre Ebro. Aunque su comportamiento es casi siempre tranquilo, como cauce de estiaje que es no está exento de episodios extraordinarios. Pero para los conocedores del río este comportamiento es lo que deberíamos esperar, y no su domesticación por encauzamiento. El artículo de Javier del Valle nos dice claramente que, para nuestro gran paisano, lo extraordinario es lo esperable.

Acabaremos este número con un repaso por las Matemáticas. A pesar de ser la Ciencia abstracta por excelencia, las usamos de forma cotidiana e inconsciente pero, sobre todo, las necesitamos. Somos una sociedad donde la información se ha convertido en imprescindible y las nuevas tecnologías precisan de lenguajes y algoritmos matemáticos que les permiten una comunicación segura y eficaz. Mariano Gas-

ca nos cuenta cómo los números nos permiten realizar transacciones económicas imposibles sin ellos. Las Matemáticas, ciencia básica, siempre han estado muy relacionadas con nuestra tierra y nuestra facultad. La Real Sociedad Matemática (RSME) está presente en Aragón desde hace muchos años, e insignes matemáticos con ella. Una más que interesante reseña histórica de la RSME en Aragón es narrada por Pedro Miana en un ameno artículo, que explora en el pasado de la Real Sociedad en nuestra tierra.

Creo que este número volverá a ser lo que siempre hemos pretendido. Ciencia y conocimiento al alcance de todos, demostrando que no es solo arduo saber académico. La Ciencia está entre nosotros mucho más de lo que el ajetreteado día a día nos permite ver. Lector, tómate un respiro y comprobarás que lo que he dicho es totalmente cierto. Hasta un próximo número.

Ana Isabel Elduque Palomo
Directora de conCIENCIAS



“El Jardín de Rosy de Palma”, por Nelida Serrano
(Premio de fotografía San Alberto Magno, ed. 2008).



LA QUÍMICA A TRAVÉS DEL ESPEJO

**POR
FERNANDO
GOMOLLÓN-BEL**

“Hoy, la quiralidad nos permite saber con exactitud cómo son por dentro las moléculas”.

La Química a través del espejo

[...] Los libros de la casa del espejo se parecen a los nuestros, pero tienen las palabras escritas al revés. [...]

Alicia en "Alicia a través del espejo", de Lewis Carroll.

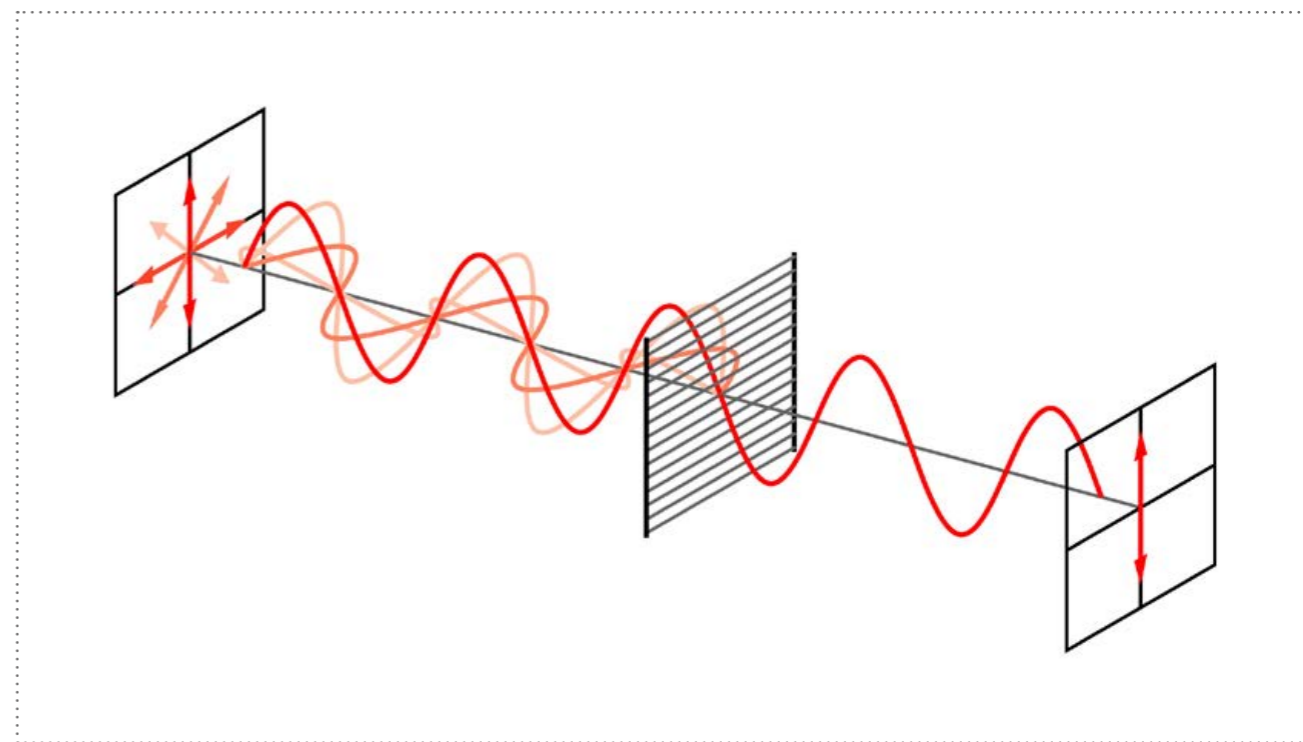
A finales del siglo XIX, tras el éxito de "Alicia en el País de las Maravillas", el matemático inglés Lewis Carroll escribió "Alicia a través del espejo." En este segundo cuento, algo menos conocido que el primero, Alicia se pregunta, mientras está en su habitación, cómo será el mundo que hay detrás del espejo. Al acercarse, toca el espejo y comprueba con sorpresa que puede atravesarlo sin apenas esfuerzo. Aventurera, como cuando siguió al conejo al País de las Maravillas, Alicia se adentra en el mundo del espejo,

y descubre una enorme variedad de locos personajes, situaciones inverosímiles y poemas incomprensibles. En el mundo a través del espejo nada tiene sentido, todo está al revés. Y, sin embargo, parece muy real. ¿Está ahí siempre? ¿Existe de verdad?

No muy lejos de donde Carroll escribía sus historias, y casi al mismo tiempo, en Francia vivía un químico que se enfrentaba a un dilema similar al de Alicia. No llegaba a comprender cómo dos compuestos químicos aparentemente iguales podían presentar comportamientos totalmente distintos cuando se les enfrentaba a la luz polarizada. Uno de ellos, el ácido tartárico aislado de las uvas, desviaba la luz polarizada hacia la izquierda. El otro, ácido tartárico sintético, procedente de una fábrica de Alsacia regentada por el célebre Joseph-Louis Gay-Lussac, no la desviaba. Este químico francés llegó a ser uno de los mejores científicos de todos los tiempos: Louis Pasteur. Son famosas sus investigaciones pioneras en Bioquímica, como el descubrimiento de la pasteurización, un proceso que nos permite esterilizar ciertos alimentos como la leche. Tomad un respiro de este artículo e id a sacar la leche de la nevera. Seguro que en algún sitio del brick pone "pasteurizada" o "UHT", que no es otra cosa que un método de pasteurización a ultra-alta temperatura.

Pero el otro descubrimiento de Pasteur, el que está relacionado con las preguntas que se hizo sobre el tartárico, es mucho menos conocido y tiene un impacto en nuestras vidas igual o mayor que la esterilización.

www.dairyinstitute.org

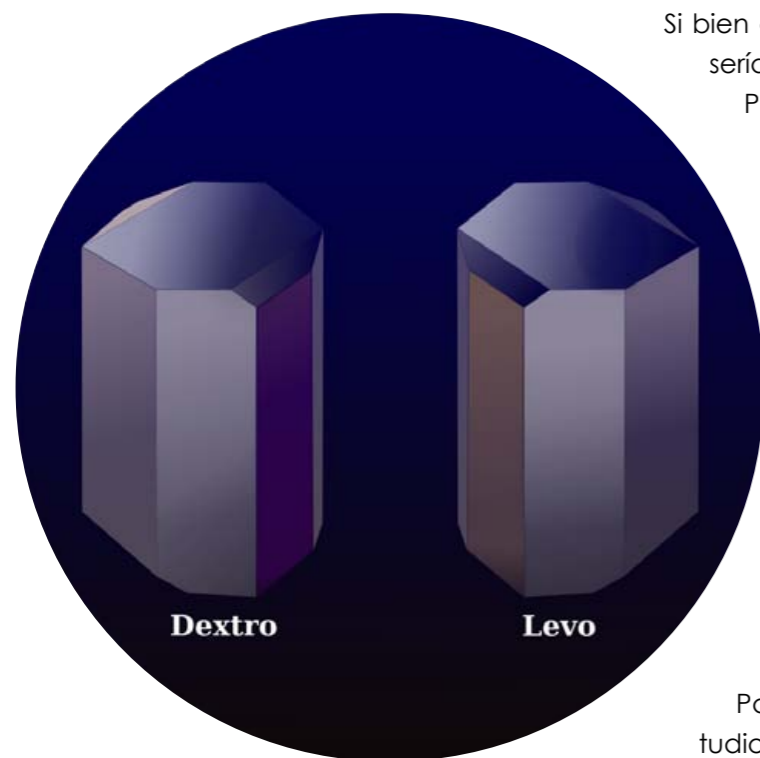


Ya a principios del siglo XIX, Jean-Baptiste Biot, físico y matemático francés, había observado que había ciertos compuestos que, bien en fase gas, líquida, o en disolución, desviaban la luz polarizada. Observó el fenómeno en el alcanfor, la trementina y el azúcar. Pasteur, sin embargo, comenzó estudiando este fenómeno en los cristales de cuarzo. Años atrás se había descubierto que los cristales de cuarzo no eran perfectos (holoédricos). Los cristales de cuarzo presentan cortes en algunos de sus vértices, lo que les hace perder grados de simetría, se vuelven hemiedricos. Pasteur comprobó que algunos cristales desviaban la luz polarizada hacia la izquierda, y otros hacia la derecha. Si uno analizaba con detalle los cristales, podía percatarse de que unos eran imágenes especulares de los otros. Pasteur descubrió, como Alicia, que los cristales del espejo se parecían mucho, pero desviaban la luz en direcciones opuestas. Pasteur, que no disponía de microscopios electrónicos ni de aparatos de rayos X, ya aventuró que este fenómeno tenía que deberse a una ordenación especial de los átomos en el cristal.

La luz normal viaja en muchas direcciones, en muchos planos al mismo tiempo. La luz polarizada es un tipo especial de luz que viaja solo en un plano. No es difícil de conseguir, basta con pasar la luz normal a través de unos filtros (llamados polarizadores). Si no hace mucho que os habéis comprado gafas de sol o sois aficionados a la fotografía, seguro que habéis oído hablar de las lentes polarizadas. Son un poco más caras, pero evitan brillos, reflejos, destellos... Esto es porque, una vez filtrada, polarizada, la luz llega al ojo (o al sensor de la cámara) en una única dirección del plano.

Wikimedia Commons

“Este químico francés llegó a ser uno de los mejores científicos de todos los tiempos: Louis Pasteur”.



Si bien este descubrimiento por sí solo hoy en día sería seguramente digno de un premio Nobel, Pasteur fue más allá. Seguía dándole vueltas al misterio del tartárico. Tenía en su laboratorio dos muestras del mismo compuesto. Todas las técnicas de las que disponía indicaban, sin duda, que las dos muestras eran ácido tartárico. Sin embargo, uno era natural, aislado de la uva, y el otro sintético, producido en la fábrica de Gay-Lussac. Su punto de fusión coincidía, su composición elemental ($C_4H_6O_6$) también, su solubilidad en diferentes disolventes era idéntica. Pero, cuando estaban disueltos y se enfrentaban a la luz polarizada, sus comportamientos eran diferentes. Pasteur, un científico brillante, recordó sus estudios doctorales sobre los cristales de cuarzo. ¿Y si al tartárico le estaba pasando algo parecido?

Pasteur preparó disoluciones muy concentradas a partir de ambas muestras y, poco a poco, las enfrió. Consiguió de este modo cristalizar el ácido tartárico. Cuál fue su sorpresa al ver que los cristales de tartárico presentaban la misma hemiedría que los cristales de cuarzo que estudió en su tesis.

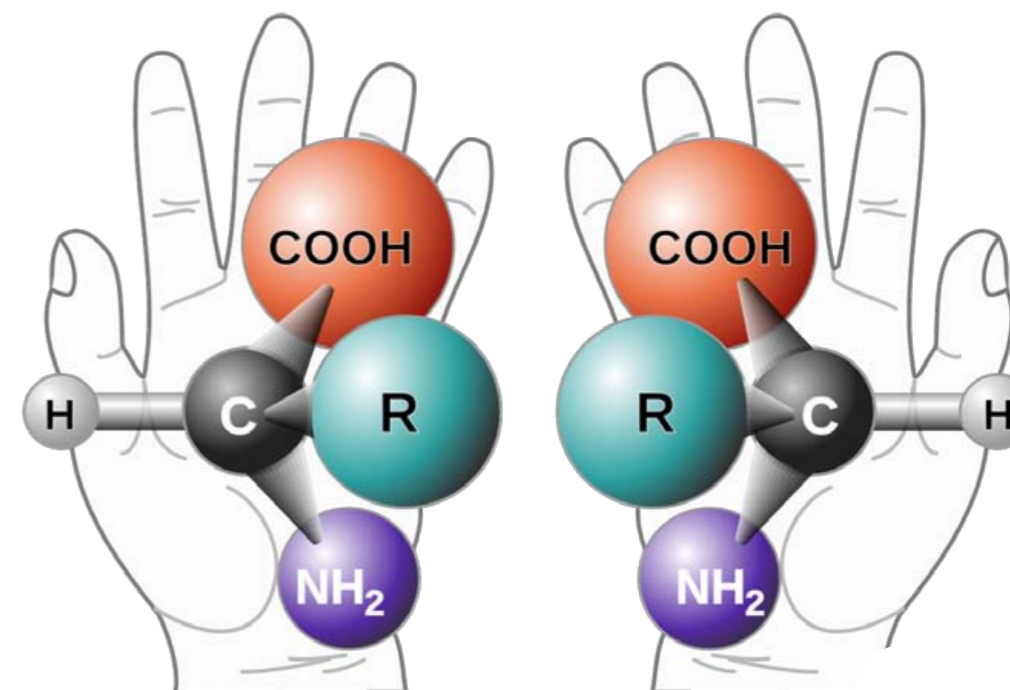
Pasteur observó que si obtenía los cristales a partir del tartárico de la uva, solo veía bajo el microscopio un tipo de prismas. Sin embargo, por alguna razón, los cristales obtenidos del compuesto sintético presentaban las dos formas, reflejo especular la una de la otra. Armado de una enorme paciencia, un microscopio bastante rudimentario y una pinza, Pasteur separó todos los cristales "izquierdos" y "derechos". Y no se quedó ahí, tenía que demostrar su teoría. Disolvió los cristales izquierdos en un recipiente y los derechos en otro. Y demostró que los primeros desviaban la luz hacia la izquierda, tal y como lo hacía el tartárico de la uva. Y que los derechos desviaban la luz en sentido contrario. Si mezclaba la misma masa de unos cristales y de los otros y los disolvía, entonces la luz no se desviaba, tal y como ocurría con el tartárico industrial. Aunque no supo explicar el motivo, había conseguido demostrar que había dos tipos de tartárico distintos. Estos debían de tener la misma composición molecular, pero había algo en su estructura que los hacía desviar la luz de manera distinta y formar cristales en espejo. Llamó a esta propiedad *dissymétrie* (disimetría) pero más adelante, en 1894, Lord Kelvin la rebautizó como **quiralidad**, del griego $\chi\epsilon\rho\iota$ (/kiéri/, mano).¹

“Apenas veinticinco años después de que Pasteur descubriera la quiralidad, Jacobus Henricus van't Hoff y Joseph Achille Le Bel propusieron una teoría que podía explicarlo todo”.

Apenas veinticinco años después de que Pasteur descubriera la quiralidad, Jacobus Henricus van't Hoff y Joseph Achille Le Bel propusieron una teoría que podía explicarlo todo. Las moléculas químicas no podían ser planas, o no darían lugar a fenómenos como los observados por Biot y Pasteur. Los dos químicos, de manera independiente, propusieron que el carbono (componente principal de más del 95% de las sustancias conocidas actualmente) formaba cuatro enlaces con un ángulo de $109,5^\circ$ entre sí, como si estuviera en el centro de un tetraedro. Esta propiedad (que sería confirmada más adelante con las teorías del enlace de valencia y de orbitales moleculares) hace que un átomo de carbono unido a cuatro sustituyentes distintos sea un centro quiral. Si cambiamos la posición de dos de esos sustituyentes, obtenemos un producto que es la imagen especular del primero y no es superponible.

Estas moléculas quirales, imágenes en espejo la una de la otra, se conocen en química con el nombre de enantiómeros. Y el hecho de que exista un mundo de moléculas al otro lado del espejo es mucho más importante de lo que parece. No porque desvíen la luz de forma distinta, sino porque dos moléculas enantiómeras van a interactuar con los seres vivos de manera distinta. Esto es debido a que los seres vivos estamos hechos de mo-

1. Quiralidad deriva de $\chi\epsilon\rho\iota$, mano en griego. Os propongo un sencillo experimento: dejad la revista un segundo y enfrentad vuestras manos, palma con palma. La una es como la imagen especular de la otra, como los cristales que aisló Pasteur. Sin embargo si intentáis poner una mano encima de la otra (palma con dorso) veréis que no se puede, queda un pulgar hacia cada lado. Lo mismo pasa con la química y las moléculas quirales. Si las miramos en un espejo, parecen la misma. Sin embargo, no son superponibles, lo que les confiere propiedades distintas, ya que interactúan con el resto de la materia de manera distinta. Igual que las manos, prueba a ponerte los guantes al revés.

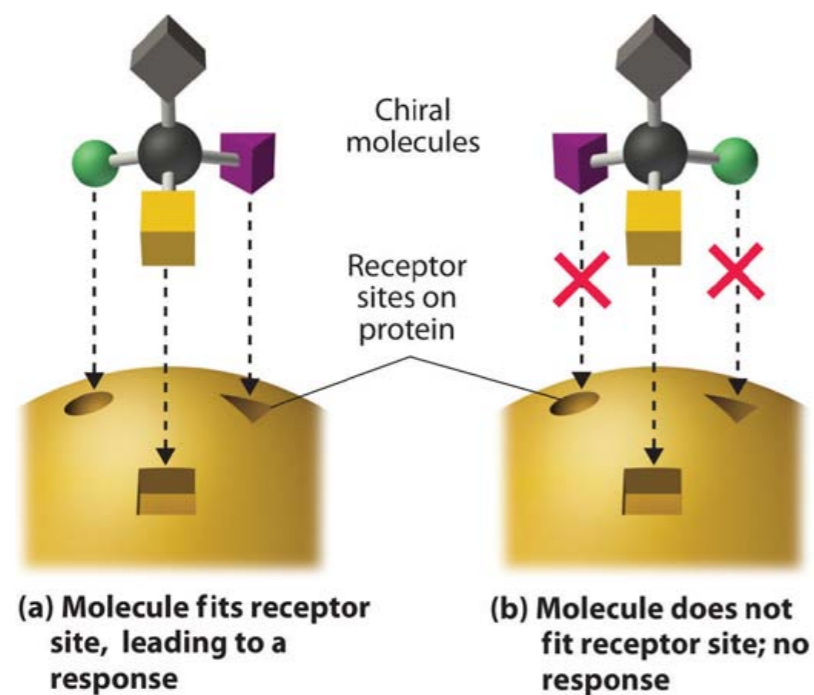


La Química a través del espejo

léculas orgánicas (mayoritariamente carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, pero también fósforo, azufre, y algún otro elemento) que tienen propiedades quirales. Los azúcares que sintetizan las plantas a partir de dióxido de carbono y agua son siempre moléculas "derechas". Los aminoácidos que forman nuestras proteínas son siempre moléculas "izquierdas". El ADN que almacena nuestro código genético no solo es quiral por estar formado por miles y miles de nucleótidos que tienen azúcar (derecho) en su estructura; sino que además la doble hélice de ADN gira hacia la derecha. Si en lugar de eso nuestras células tuvieran un ADN del mundo del espejo, girando hacia la izquierda, quién sabe qué nos ocurriría.

Las moléculas quirales interactúan con nuestros receptores de manera distinta, según sean izquierdas o derechas. Por ejemplo, existen dos tipos de limoneno. Uno de ellos huele a limón. Su compuesto del mundo del espejo, su enantiómero, huele a pino. Si no le veis la importancia

a este fenómeno (qué puede pasar más allá de que algún día alguien se equivoque y haga millones de asquerosos caramelos con sabor a pino) pensad en que hay otras moléculas, que tomamos frecuentemente, que también interactúan con receptores en nuestro cuerpo: los medicamentos y las drogas. Controlar la quiralidad tiene una importancia enorme a la hora de desarrollar fármacos. Es aquí cuando descubrimos el verdadero impacto de los experimentos de Pasteur. El ejemplo más conocido es el caso de la talidomida. La talidomida es un fármaco que se administró a embarazadas en los años 1950 y 1960 que presenta dos formas enantiómeras. Una de ellas es un sedante y calma las náuseas típicas de los primeros meses de embarazo. La otra, la del mundo del espejo, tiene efectos teratogénicos: causa malformaciones en el feto. Grünental, la industria que comercializaba la talidomida, vendía la talidomida izquierda y la derecha juntas. Las embarazadas sentían los efectos calmantes de una de las moléculas espejo, pero no notaban los



General
Chemistry:
Principles,
Patterns, and
Applications.
Saylor Academy,
2012.



efectos de la otra hasta que no nació el bebé. Pese a que los descubrimientos de Pasteur datan de mediados del XIX, hubo que esperar a que nacieran cientos de niños con malformaciones para que la FDA² americana cambiara sus leyes. Desde entonces, exige que las moléculas activas biológicamente y sus hermanas del otro lado del espejo se estudien por separado. Si una de las dos es eficaz y la otra no causa ningún problema, podrán administrarse de manera conjunta. Sin embargo, si una es eficaz y la otra muestra algún efecto negativo en los tests de laboratorio, será obligatorio comercializar el enantiómero "bueno" de forma pura.

Aquí es donde entran en acción los químicos de hoy en día. Gran parte de todo el esfuerzo sintético que se lleva a cabo en los laboratorios de todo el mundo se dedica a la obtención de moléculas enantioméricamente puras. Esto puede hacerse de muchas formas. En primer lugar, pueden diseñarse catalizadores quirales: si llevamos a cabo una reacción en su presencia, pueden contagiar sus pro-

piedades quirales a nuestros productos. Sería el equivalente a hornear galletas con formas (en este caso el catalizador quiral sería el molde). Lo ideal es buscar catalizadores que consigan contagiar al máximo su quiralidad, y obtener todas las moléculas del producto del mismo tipo: todas izquierdas o todas derechas, pero todas iguales. Otro método que también utilizan los químicos es aprovechar que la quiralidad ya existe en la naturaleza. Los azúcares, los

“Las moléculas quirales interactúan con nuestros receptores de manera distinta, según sean izquierdas o derechas”.

2. La FDA, *Food and Drug Administration* (Administración de Alimentos y Medicamentos), es la máxima autoridad estadounidense en el control de seguridad y regulación de alimentos, medicamentos, cosméticos, aparatos médicos y productos biológicos para humanos y animales.



Louis Pasteur (1822-1895).

historico.oepm.es

aminoácidos y los ácidos nucleicos, por ejemplo, son moléculas quirales. Si nosotros empezamos una síntesis a partir de un producto del que ya conocemos su quiralidad, bastará con no modificarla para poder conseguir productos enantioméricamente puros. Siguiendo con el símil de las galletas, aquí la trampa sería comprar las galletas ya hechas. Así ya tienen una forma determinada. Nosotros nos limitaremos a recubrirlas de glaseado. Finalmente, otro método sería preparar de golpe las dos moléculas, izquierda y derecha y luego, como hizo Pasteur en su día con el tartárico, separarlas. Para ello, además de las técnicas de cristalización como la usó Pasteur, existen unos aparatos llamados cromatógrafos de alta resolución que son capaces de separar dos enantiómeros. No obs-

tante, este método suele utilizarse únicamente para comprobar la pureza de nuestros productos. Utilizarlo para separar es tedioso y, sobre todo, muy poco ecológico. Al preparar las dos moléculas espejo a la vez, por cada kilo que preparamos de la que nosotros queremos, generamos un kilo de la molécula contraria que no nos interesa, que habrá que tirar.³

[...] Sí, parece muy bonito [...] pero es bastante difícil de comprender. [...]

Alicia en "Alicia a través del espejo", de Lewis Carroll.

Louis Pasteur, como Alicia, se adentró en el mundo del espejo. Descubrió una propiedad fun-

damental de la química muy bonita, la quiralidad. No supo explicarla, la verdad es que no era sencillo con las herramientas de las que disponía. Pero, fue gracias a él que, más adelante, pudimos al fin comprenderla. Hoy, la quiralidad nos permite saber con exactitud cómo son por dentro las moléculas, cómo interaccionan éstas con los seres vivos y cómo, jugueteando un poco con ella, podemos diseñar nuevos compuestos con grandes beneficios. La aventura de Alicia fue un sueño. Por suerte, el viaje de Pasteur al otro lado del espejo ocurrió de verdad.

Fernando Gomollón-Bel

Químico y divulgador científico
@gomobel

“Louis Pasteur, como Alicia, se adentró en el mundo del espejo. Descubrió una propiedad fundamental de la química, la quiralidad. No supo explicarla pero, fue gracias a él que, más adelante, pudimos al fin comprenderla”.



3. En la serie de televisión Breaking Bad, el protagonista, Walter White, un profesor de química de instituto al que le diagnostican un cáncer de pulmón terminal, decide sintetizar y vender metanfetamina para poder dejar algo de dinero a su familia cuando muera. La metanfetamina es una molécula quiral y tiene dos enantiómeros, uno con efectos psicoactivos y otro no. Generalmente los camellos venden la mezcla de los dos, por lo que solo la mitad de la dosis produce efecto. Walter White desarrolla un método nuevo, con una catálisis selectiva que produce únicamente la metanfetamina activa. De ahí que su droga triunfe tanto en el mercado y le guste más a los narcotraficantes que la notan "más pura" y dicen que "pega más fuerte".

RIADAS DEL EBRO: COMPRENDERLAS SIN MIEDO

“Las riadas e inundaciones forman parte del funcionamiento natural de un sistema fluvial, no hay que considerarlo como un acontecimiento extraordinario”.

POR JAVIER DEL VALLE

Riadas del Ebro: comprenderlas sin miedo

EL ECOSISTEMA FLUVIAL

Identificamos como río una corriente de agua superficial y permanente, aunque varíe su caudal, pero en realidad se trata de un sistema natural muy complejo con multitud de interrelaciones entre sus elementos. Se trata también de un sistema dinámico, con gran capacidad de evolucionar en el tiempo, a una escala temporal relativamente breve, apreciable por el ser humano, tal y como se aprecia en las imágenes, que en ocasiones es casi repentina.

Los ríos como algo complejo y dinámico, están constituidos por una serie de elementos como:

- El cauce: el canal natural por el que discurre el agua, que puede presentar morfologías muy diferentes.
- El caudal; la cantidad de agua que discurre por el cauce, normalmente con una importante variabilidad temporal en función de las características climáticas de la cuenca y de otros factores.
- Los sedimentos arrastrados por el caudal, de características físico-químicas variables y que juegan un papel importante en la generación de diferentes morfologías en el cauce y en su dinamismo.
- Las riberas y la vegetación que crece en ella, que si está bien desarrollada presenta una notable diversidad, con presencia de especies herbáceas, arbustivas y arbóreas dispuestas según sus necesidades hídricas y adaptación a las variaciones del caudal. Si su estado de conservación es bueno puede tener gran continuidad, y funciona como un corredor biológico, contribuye a la depuración natural de las aguas y su oxigenación, pues limita la subida de temperaturas y protege de la erosión a las riberas.
- La llanura de inundación: la superficie que queda cubierta por el agua en los periodos de avenida ordinaria (el caudal de crecida

ordinaria es definido por el Reglamento del Dominio Público Hidráulico como la media de los máximos caudales anuales, en su régimen natural, producidos durante diez años consecutivos, que sean representativos del comportamiento hidráulico de la corriente).

- El acuífero aluvial: las aguas subterráneas, normalmente a escasa profundidad y conectado con las aguas superficiales (el caudal), con las que suele tener relaciones de intercambio.
- La fauna que se desarrolla dentro del río, asociada a la flora del cauce y en sus inmediaciones, especialmente en las formaciones vegetales de ribera.

El dinamismo fluvial está determinado fundamentalmente por el caudal, su carga de sedimentos, morfología del cauce o estado de los bosques de ribera. A su vez estos elementos quedan fuertemente influidos por las características de la cuenca hidrográfica (territorio cuyas aguas de escorrentía superficial fluyen de forma natural a un mismo río). Las características de la cuenca más influyentes son el clima, la vegetación y la geología (características litológicas, relieve, etc.), pero entre ellas se establece a su vez una compleja red de interrelaciones, las más importantes de las cuales se muestran en la figura anexa.

LAS INUNDACIONES, SUS CAUSAS Y CONSECUENCIAS

El río Ebro cuenta con una cuenca fluvial de más de 85.000 km², de gran complejidad climática, pues en su cabecera domina el clima de tipo oceánico, en desembocadura el mediterráneo, en su tramo medio el mediterráneo semiárido, y en muchas zonas del norte y sur de la cuenca intervienen importantes modificaciones por la presencia de montañas, que generan climas con características específicas. Como casi todos los ríos del mundo cuenta con episodios

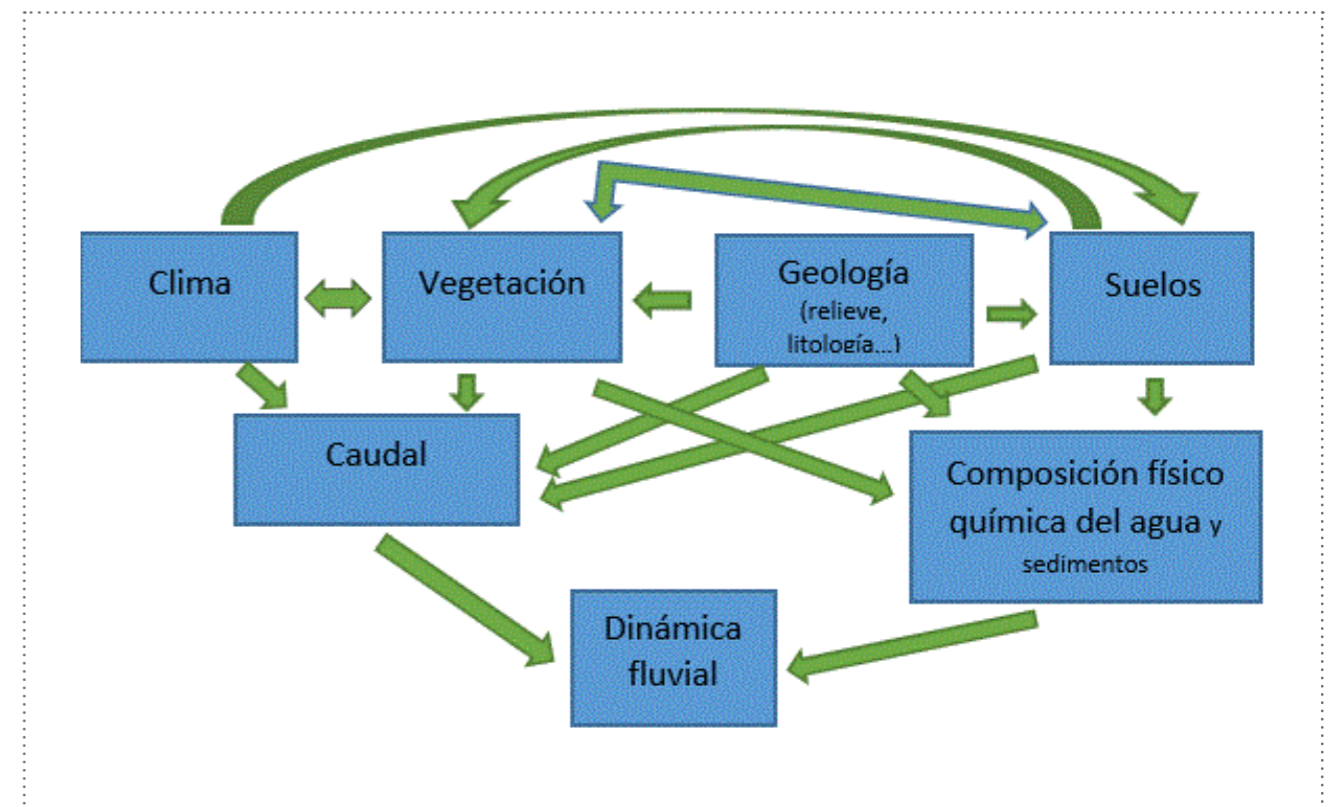
de abundante caudal que provoca riadas e inundaciones de sus zonas próximas, algo absolutamente natural y que forma parte consustancial de la dinámica fluvial de cualquier río.

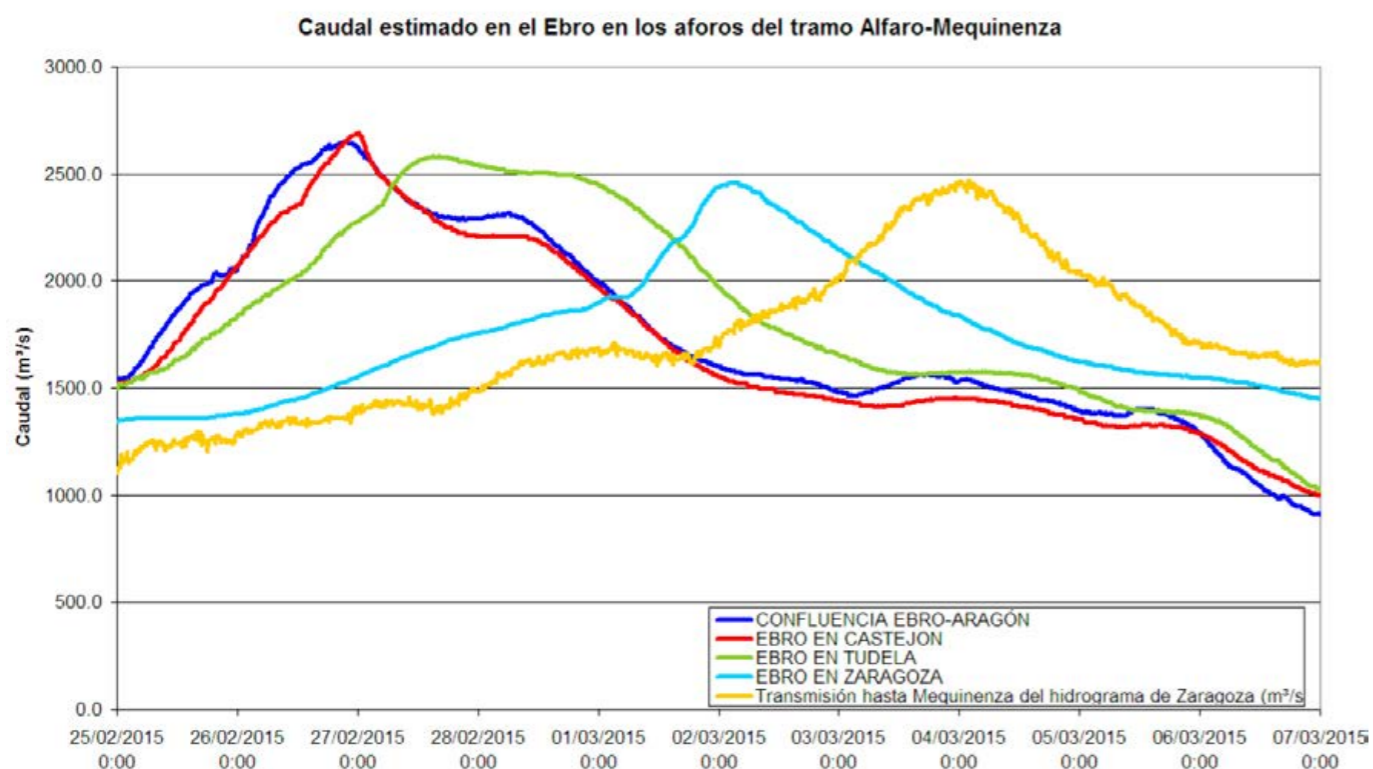
La mayor parte de las inundaciones en el eje del Ebro en su tramo medio (tramo entre Logroño y Sástago) se producen en invierno. En su génesis intervienen muchos factores y, aunque no hay dos episodios de inundación iguales, sí que se puede establecer



Río Ebro en Alcalá de Ebro en 1927 y 1997, ejemplo del dinamismo del mismo en este tramo (arriba) y principales interrelaciones entre los componentes de un sistema fluvial (abajo).

Imágenes cortesía CHE.





Hidrograma de las inundaciones de febrero-marzo de 2015.

Fuente: C.H.E.

un patrón que se repite en muchos de ellos: un periodo de nevadas abundantes que afecta a los Pirineos, cabecera del Ebro y sector norte del Sistema Ibérico, con nieves en ocasiones a cotas relativamente bajas (norte de la provincia de Burgos, sur de Cantabria, Álava y Navarra) seguido de un episodio de subida de temperaturas, en ocasiones acompañado de lluvia, que provoca fusión rápida de la nieve acumulada fuera de las zonas de montaña. La cantidad de nieve acumulada anteriormente, la rapidez de la subida de temperaturas y la cantidad de lluvia caída durante este ascenso, entre otros factores, se combinan para determinar la cantidad de agua que afluye al cauce del Ebro directamente o a través de sus afluentes y la rapidez de esta fluencia, generando así inundaciones de mayor o menor intensidad.

También en el comportamiento de la inundación a lo largo del Ebro se observa algún patrón que suele ser común, como el hecho de que en Castejón de Ebro y Tudela la punta de avenida suele ser de mayor caudal que en Zaragoza, como se puede apreciar en la gráfica. Entre las dos localidades navarras y la capital aragonesa no existe ningún mecanismo de regulación artificial del caudal, la explicación a este fenómeno se debe a la ocupación de la llanura de inundación y de su acuífero asociado por el caudal que desborda el cauce ordinario.

De este modo las tierras próximas al río topográficamente planas actúan de almacén natural de agua, produciendo el efecto de "laminación de avenida" que se observa al comparar los hidrogramas de Zaragoza con los de Tudela y, especialmente, Castejón. Así miles de hectáreas pueden quedar cubiertas por las aguas, lo que explica el nombre de "llanura de inundación" (ver imagen adjunta). La presencia en esta zona de campos, granjas, infraestructuras de comunicación o cualquier

instalación significa, por lo tanto, que puede quedar anegada dependiendo del alcance de la inundación.

Es importante señalar que la subida del caudal del Ebro en su tramo medio se produce de forma progresiva, normalmente a lo largo de varios días. No se trata de inundaciones inmediatas tipo "flash flood" como las que ocurren en algunas cuencas de la vertiente mediterránea española, ante las que es difícil alertar a la población, sino de eventos cuya génesis y desarrollo es progresivo y se observa con el suficiente tiempo como para avisar a la población afectada.

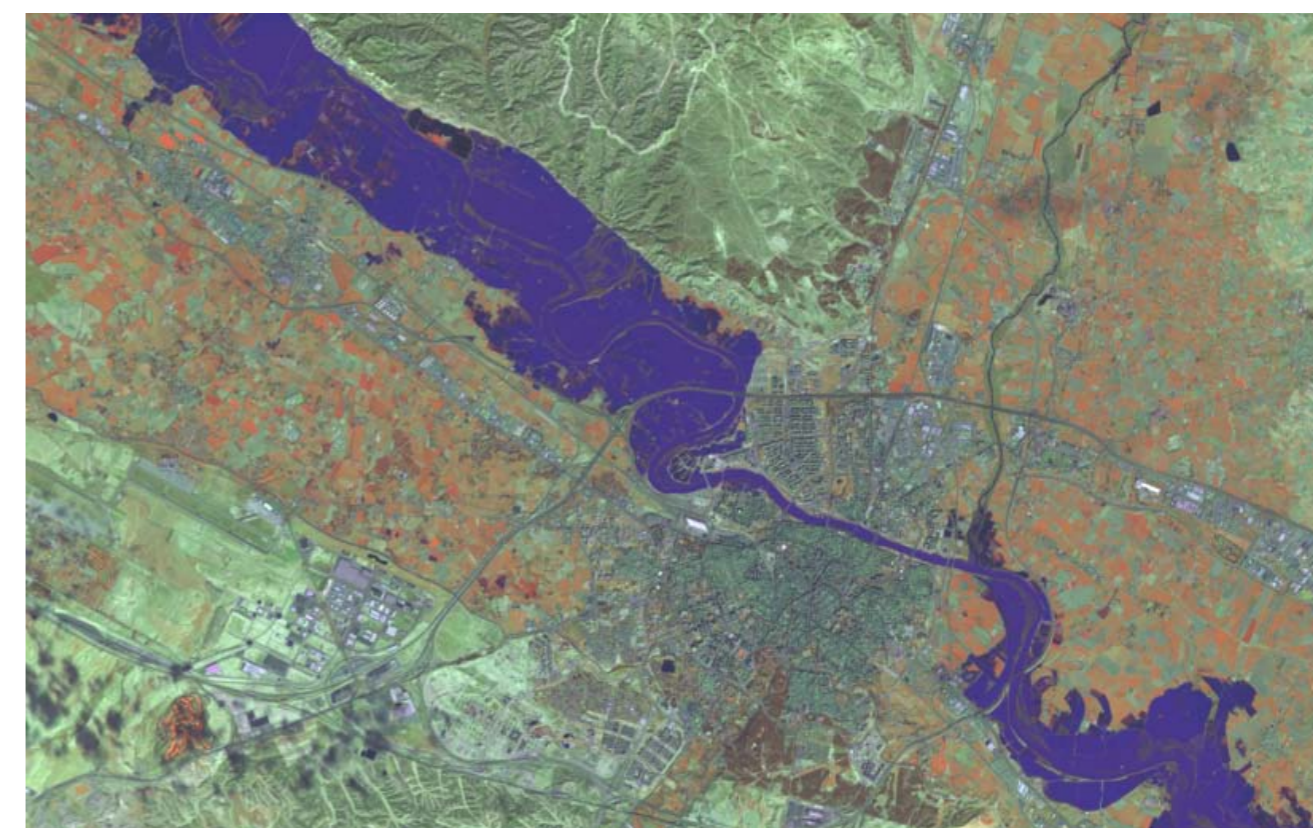
Durante estos episodios de abundante caudal e inundaciones, se acelera la dinámica fluvial, lo que tiene consecuencias como:

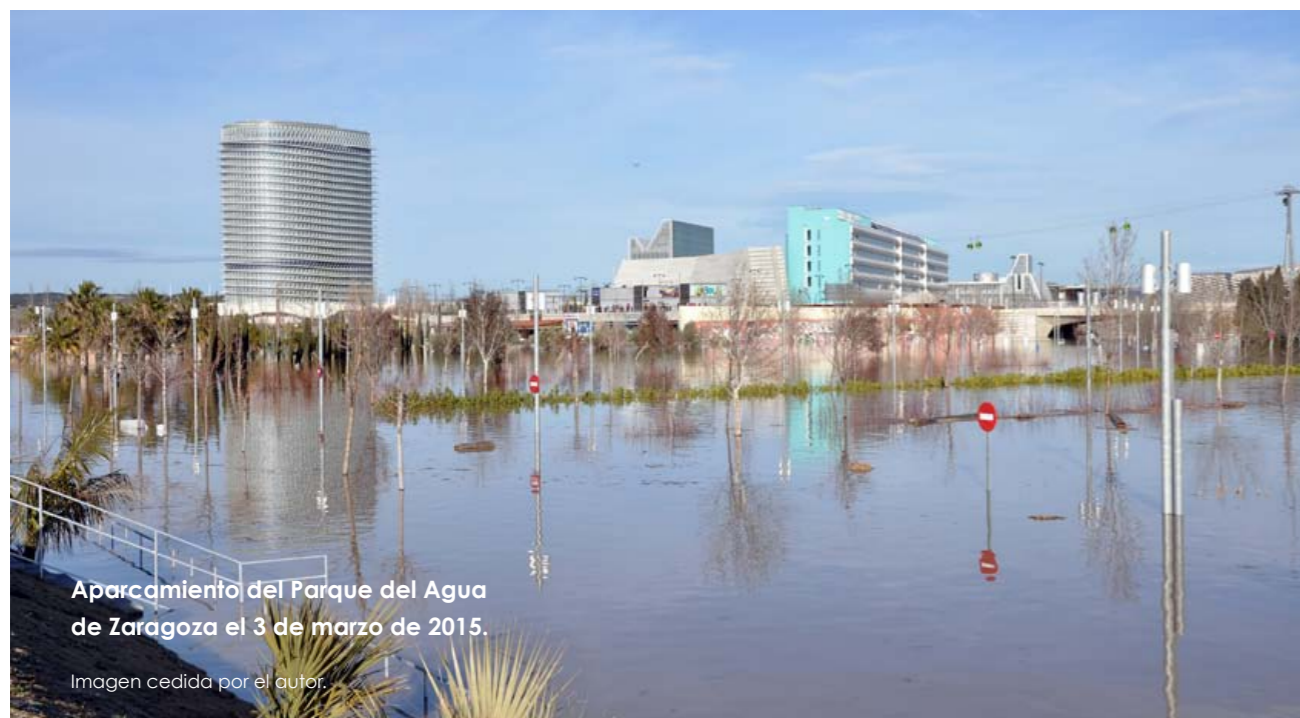
- Cambios geomorfológicos en el cauce, como consecuencia de la erosión en unas orillas (las que reciben la embestida del agua con más velocidad) y la sedimentación de gravas, arenas o limos en otros lugares (aquellos en los que el agua pierde velocidad).
- Aporte de materiales limosos o arcillosos en algunas zonas inundadas, que contribuyen a aumentar la fracción fina de los suelos, mejorando su fertilidad.

“Las tierras próximas al río topográficamente planas actúan de almacén natural de agua, produciendo el efecto de laminación de avenida”.

Imagen Landsat 8. Composición en falso color (3 de marzo de 2015).

Fuente: Landsat. Imagen cortesía C.H.E.





Aparcamiento del Parque del Agua de Zaragoza el 3 de marzo de 2015.

Imagen cedida por el autor.

- Renovación del bosque de ribera, por muerte y arrastre de individuos viejos, extensión de semillas, etc.
- Posible generación de nuevos galachos (meandros del río que quedan separados del cauce convirtiéndose en zona húmeda conectada con el acuífero aluvial).

También pueden producirse fenómenos no deseados como la extensión de contaminantes, basuras o escombros de origen humano depositados en las proximidades del cauce o llanura de inundación, por lo que hay que evitar depositar este tipo de elementos aquí.

LA SOCIEDAD FRENTE A LAS INUNDACIONES

Las inundaciones, como parte integrante de la dinámica de los ecosistemas fluviales, tiene unas repercusiones positivas sobre este, pero afectan a las actividades económicas desarrolladas en la llanura de inundación, provocando pérdidas de diferente cuantía en función de factores como la extensión del evento y la exposición de infraestructuras y elementos pro-

ductivos a estas. El cálculo de pérdidas económicas en las riadas de principios de marzo de 2015 se estimó en 50 millones, de ellos 25 en Aragón.

Es comprensible que la sociedad intente minimizar los daños sufridos, pero siempre ha de hacerse teniendo en cuenta que no se trata de fenómenos extraordinarios, sino integrantes del funcionamiento de los sistemas fluviales, por lo que han de tenerse muy en cuenta las consecuencias de las intervenciones sobre estos. Vamos a realizar un análisis crítico de las posibles soluciones propuestas en ocasiones:

Construcción de motas y defensas:

Son útiles para impedir la llegada del agua a determinados lugares como núcleos de población o infraestructuras no compatibles con la inundación, pero si se impide al agua extenderse por algunas zonas, lo hará por otras, por lo que el problema se traslada. No son útiles cuando el freático está saturado (algo muy habitual en estos eventos) y se producen emanaciones de caudal desde este a la superficie. Pueden

ser contraproducentes si por alguna razón (rotura o superación de la defensa) se inunda la zona que estas deberían proteger, pues la vuelta de caudales al río se dificulta y se alarga el periodo de anegamiento.

Estas construcciones significan una desnaturalización del ecosistema fluvial, impiden el desarrollo de los bosques de ribera en sus orillas y por lo tanto sus beneficios (sujeción del suelo, disminución de la fuerza erosiva en las orillas, depuración natural del agua o biodiversidad y mayor calidad paisajística de las riberas).

Dragado del río:

Puede ser útil en tramos cortos, de forma puntual para aumentar la capacidad de drenaje, evacuar el agua más rápidamente y disminuir riesgo o superficie inundada, pero es inviable dragar largos tramos del río por su elevado coste económico y el severo impacto ambiental, pues destruye los hábitats del fondo, disminuyendo la fertilidad del sistema. Además su utilidad dura muy poco, pues la propia dinámica

del río tiende a recuperar la situación anterior, especialmente en periodos de caudal abundante.

Mayor regulación de la cuenca mediante la construcción de más embalses:

Los embalses ayudan a regular los ríos almacenando agua cuando llevan mucho caudal y soltándola de forma controlada cuando hace falta. Gestionados correctamente sirven para laminar avenidas, pues disminuyen el caudal máximo (punta) reduciendo así sus efectos negativos. En la cuenca del Ebro los embalses existentes, sean de titularidad pública o privada, en situación de avenida se gestionan por la C.H.E. (Confederación Hidrográfica del Ebro) con el fin de disminuir los efectos negativos de las riadas.

Sin embargo en el tramo central del eje del Ebro no se pueden construir embalses, habría que hacerlo en los afluentes. Se trata de infraestructuras complejas y caras con importantes consecuencias ambientales negativas como el anegamiento permanente de valles y tramos



Reforzamiento de la mota de defensa de Alcalá de Ebro.

Fuente: cortesía C.H.E.

Riadas del Ebro: comprenderlas sin miedo

de ríos, la alteración de la dinámica fluvial, disminución de la cantidad de aluviones y material sólido, que queda retenido en el embalse, y efectos negativos sobre comunidades de peces migratorias que ven bloqueadas sus rutas por la barrera física que suponen los embalses.

También tienen consecuencias sociales negativas, como pérdida de tierras de cultivo, desorganización del territorio o, en ocasiones, traslado forzoso de población.

Evitar la instalación de actividades e infraestructuras incompatibles con la inundación en las zonas de mayor riesgo:

En zonas inundables es posible desarrollar ciertos tipos de agricultura (preferiblemente con seguros), infraestructuras elevadas, ganadería con protocolo de evacuación, etc. Por el contrario no son compatibles los usos residenciales o industriales ni los ganaderos sin protocolo de evacuación.

No existe una medida que resulte "la adecuada" ni es sencilla la gestión de inundaciones buscando el mayor respeto al medio ambiente fluvial y el menor daño para la sociedad, pero una visión integral de la cuenca hidrográfica sin duda ayuda. En España contamos con la ventaja de disponer de los organismos de cuenca (la Confederación Hidrográfica del Ebro en el caso de nuestro río) que desarrolla sus funciones con esta visión y escala de cuenca, adaptándose así a la unidad natural del agua en superficie.

Una visión integral de una cuenca hidrográfica facilita la gestión de las inundaciones actuando antes, durante y después del evento y la aplicación de medidas que ayudan a disminuir sus efectos negativos, tales como:

- Predicción de situaciones de riesgo, algo que en el caso del Ebro se realiza mediante el Sistema de Información Hidrológica de la C.H.E. (www.saihebro.com).

“Es comprensible que la sociedad intente minimizar los daños sufridos, pero siempre ha de hacerse teniendo en cuenta que no se trata de fenómenos extraordinarios”.

- Manejo de los embalses para laminar la avenida, evitando la concentración de caudales muy abundantes en los cauces principales.
- Restauración de zonas desforestadas en la cuenca para ralentizar la escorrentía y disminuir los procesos erosivos.
- Restauración de bosques de ribera para disminuir la velocidad y por lo tanto la capacidad erosiva de una riada.
- Facilitar el drenaje mediante dragados en lugares puntuales que interese proteger de la inundabilidad.
- Protección de la población y de las instalaciones localizadas en zona inundables (programas de evacuación, defensa, etc.).
- Promoción de los seguros en zonas de mayor riesgo.
- Ordenación del territorio favoreciendo los usos compatibles con la inundabilidad periódica en las zonas de mayor riesgo de la llanura de inundación.

CONCLUSIONES

Las riadas e inundaciones forman parte del funcionamiento natural de un sistema fluvial, no hay que considerarlo como un acontecimiento extraordinario.

En el caso del tramo medio del río Ebro su génesis es progresiva, por lo que da tiempo suficiente a avisar a la población afectada y tomar las medidas necesarias de protección.

En ocasiones causan daños a infraestructuras e instalaciones situadas en la zona inundable por lo que hay que intentar minimizar estos.

No existe una "solución" para evitar los daños señalados, pero una visión global de la cuenca en la que se integre la gestión de las inundaciones y su tratamiento antes, durante el evento y después del mismo, ayuda.

La ordenación de usos e instalaciones en la zona inundable es muy necesaria, primando las más compatibles con la inundabilidad y eliminando o disminuyendo las más vulnerables.

Javier del Valle

Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza
delvalle@unizar.es

BIBLIOGRAFÍA

- Del Valle, J. (2003). "Usos y funciones del agua en la Cuenca del Ebro." Instituto Aragonés del Agua, ed. Prames. Zaragoza. pp 177, ISBN: 84-8321-1440.
- Del Valle, J., Ollero A. y Sánchez M. (2007). "Atlas de los ríos de Aragón." pp 540. Ed. Prames, Instituto Aragonés del Agua. ISBN: 978-84-8321-186-1.
- Ollero A., Sánchez M. y Del Valle J. (2004). "Problemática actual del corredor ribereño del Ebro aragonés en su curso de meandros libres." En "El Medio físico de Aragón., aspectos generales y temáticos". Ed. Peña J. L. Longares L. A. y Sánchez M. Formato Cd, pp 11 ISBN: 84-9614-29-X.
- Ollero A. (2010) "Channel changes and floodplain in the meandering middle, Ebro River, Spain." *Geomorphology* 117, pp 247-260.
- Sánchez M., Ollero A. y Del Valle, J. (2004). "La red fluvial de Aragón." En "El Medio físico de Aragón., aspectos generales y temáticos". Ed. Peña J. L. Longares L. A. y Sánchez M. Formato Cd pp 16. ISBN: 84-9614-29-X.



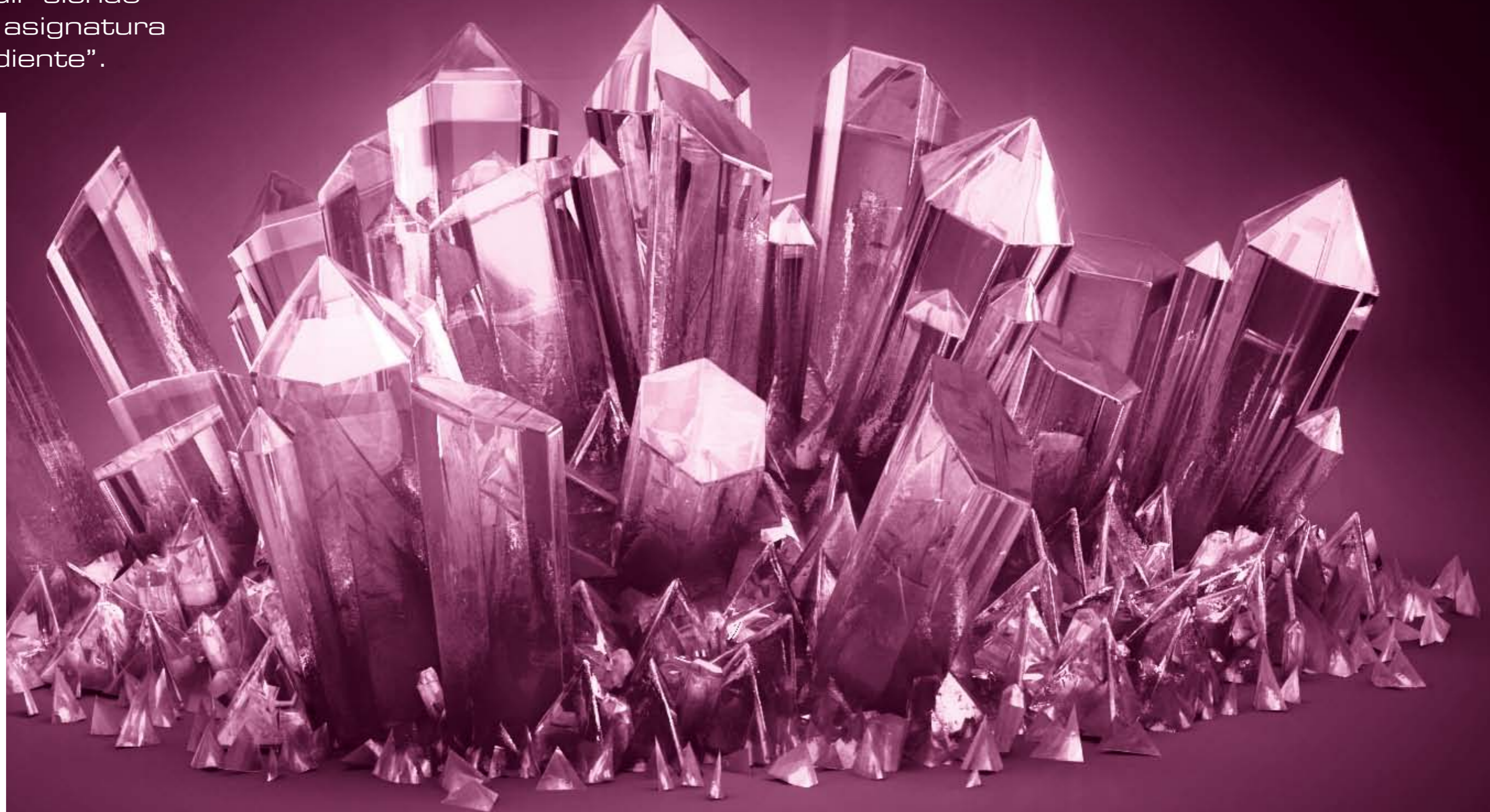
Embalse de Vadiello. Regula el Guatzalema y almacena agua para abastecer la ciudad de Huesca.

Imagen cedida por el autor.

ÁTOMOS Y MOLECULAS DE CRISTAL

“En España, la influencia de la Cristalografía ha sido espectacular. Sin embargo, especialmente en el mundo académico, parece seguir siendo una asignatura pendiente”.

POR MARTÍN MARTÍNEZ-RIPOLL



Aún recuerdo cuando siendo todavía un jovencito, en las clases de Geología del primer año de licenciatura, un decidido profesor se esforzaba en dar vueltas a un taco de madera que sostenía entre dos dedos de su mano izquierda. El sólido que mostraba estaba tallado en forma de "Jacinto de Compostela", y girándolo trataba inútilmente de que entendiéramos el significado de frases parecidas a "...y esta es la cara uno, uno, cero". Un compañero, más perspicaz que yo, insinuó que debía tratarse de alguna explicación sobre algo que parecía estar relacionado con los cristales. Pero mirando de reojo a las desvencijadas cristaleras de las ventanas nos preguntamos ¿de qué cristales estaría hablando? Finalmente pudimos deducir que todo aquello probablemente estaría relacionado con los minerales pero, en cualquier caso, el asunto pasó al sueño de los justos durante el resto de la licenciatura.

Curiosidades del destino, pasados aquellos años aquel jovencito acabó el resto de su vida conquistado, no por los tacos de madera o por las frases enigmáticas, sino por algo tan atractivo y potente como es la ciencia que estudia los cristales. Permitan pues que les presente a

nuestra invitada, la Cristalografía, y tratemos de deducir de qué cristales hablaba aquel profesor. Desconocemos si a través de estas páginas seremos capaces de descubrir si esto de los cristales es importante o no pero, en cualquier caso, la intención es que lo disfrute. Si al final de la lectura echa en falta respuestas, allí encontrará más pistas y será señal de que este relato le ha interesado.

¿QUÉ ES LA CRISTALOGRAFÍA Y PARA QUÉ SIRVE?

La Cristalografía es la rama de la Ciencia que estudia los cristales. Hoy sabemos que los cristales contienen átomos, moléculas y/o iones que forman unidades de repetición, llamadas celdillas elementales que, como ladrillos apilados en tres dimensiones, forman el edificio cristalino, tal y como en ocasiones vemos las piezas de fruta en un mercado. Estos patrones de apilamiento y repetición provocan en los cristales diferentes tipos de hábitos que, desde hace miles de años, en el caso de los minerales han llamado la atención por sus propiedades, colores y formas. Muy probablemente esta aclaración ya le habrá servido al lector para darse cuenta de que cometemos un error cuando denominamos

"cristales" a los materiales que cierran nuestras ventanas. Es una perversión lingüística que hay que buscarla en el hecho de que en el siglo I d.C los antiguos romanos usaban grandes cristales de "Lapis specularis" (el nombre en latín para los cristales de yeso transparente), exfoliados en láminas, para cerrar las ventanas de sus invernaderos. Y es que esta forma deshidratada del sulfato de calcio, debido a su transparencia, gran tamaño

y planaridad, se extraía en grandes cantidades de las minas de Segóbriga (España). Los mal llamados cristales de las ventanas son realmente vidrios, materiales cuyos átomos apenas muestran orden.

Con las herramientas que se han desarrollado durante el siglo XX alrededor de esta ciencia, la Cristalografía es capaz de averiguar la estructura íntima de la materia de la que están formados los cristales, sea esta viva o inanimada. Conocer la estructura interna de la materia significa averiguar las posiciones de todos los átomos y determinar sus modos de unión que, en muchos casos, forman agrupaciones atómicas que conocemos con el nombre de moléculas. La estructura atómica y molecular de la materia genera conocimiento que es utilizado por químicos, físicos, biólogos y muchos otros investigadores, pues esta información permite no solo comprender las propiedades de la materia, sino también modificarlas para nuestro beneficio.

¿CUÁNDO COMENZÓ LA CRISTALOGRAFÍA COMO CIENCIA?

Aunque las primeras referencias históricas sobre el uso de cristales parece que se remontan a los antiguos sumerios (cuarto milenio a.C.), no fue hasta los siglos XVII y XVIII cuando aparecieron las primeras hipótesis científicas sobre la naturaleza interna de los cristales, y todo ello basándose exclusivamente en la observación de su morfología. Al astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630) le llamó mucho la atención que los pequeños cristales de nieve que aterrizaban sobre su gabán siempre aparecieran con seis puntas, y nunca con cinco o siete, llegando



El apilamiento ordenado de piezas de fruta genera formas externas llamativas (arriba).

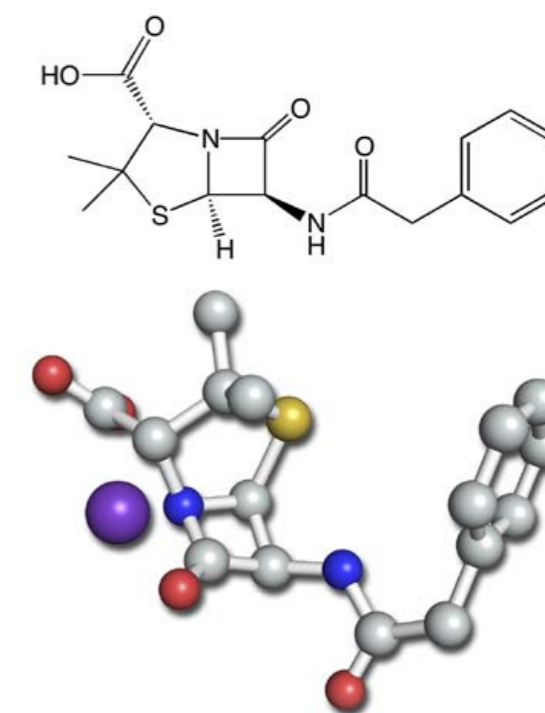
Solo después de que por medio de la cristalografía se pudiera determinar la estructura molecular de la penicilina, los químicos pudieron abordar su síntesis, consiguiendo así salvar millones de vidas (abajo).

Imágenes cedidas por el autor.



Cristal de cuarzo ferruginoso, conocido vulgarmente con el nombre de Jacinto de Compostela.

Imagen adaptada de http://mineralespana.es/pm_espana.





“Al astrónomo alemán Johannes Kepler le llamó mucho la atención que los pequeños cristales de nieve que aterrizaban sobre su gabán siempre aparecieran con seis puntas”.

a suponer que estos estaban formados por apilamientos de partículas, tal como hemos indicado más arriba con las piezas de fruta. Basándose también en la mera observación de las formas, el investigador danés Niels Stensen (1638-1686) y el mineralogista francés Jean-Baptiste Louis Romé de l'Isle (1736-1790) establecieron la denominada ley de la constancia de ángulos entre caras en los diferentes ejemplares de una misma especie mineral. Y con todo ello, el abate de la catedral de Notre Dame, René Just Haüy (1743-1822), llegó a la conclusión de que los cristales estaban constituidos por el apilamiento ordenado de pequeños ladrillos, o celdillas elementales, todas ellas idénticas. En el siglo XIX, el médico alemán Johann Friedrich Christian Hessel (1796-1872), basándose en la observación de la simetría y de las diferentes posibles morfologías de los cristales, demostró que en estos solo pueden existir ejes de rotación de orden 2, 3, 4 y 6, llegando a deducir que únicamente podían existir 32 combinaciones de elementos de simetría (las llamadas clases cristalinas). Por su lado, el físico francés Auguste Bravais (1811-1863) demostró que, por coherencia con la simetría, las repeticiones por translación en los cristales solo pueden realizarse de 14 modos diferentes (las redes de Bravais).

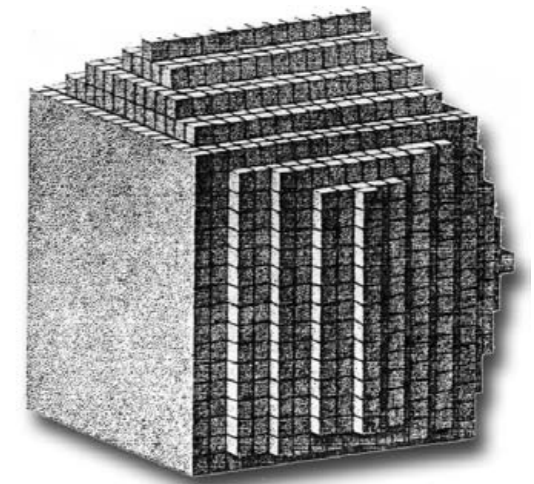
Finalmente, unos 50 años más tarde, las 14 redes de Bravais y las 32 clases cristalinas fueron las limitaciones entre las que se debatieron las ideas de los matemáticos Evgraf S. Fedo-

rov (1853-1919) y Arthur Schoenflies (1853-1928) para deducir los llamados grupos espaciales, que son los 230 modos posibles a los que se restringen las distribuciones repetitivas de las unidades de construcción de los cristales (átomos, iones y moléculas).

Sin embargo, y a pesar del esfuerzo intelectual que supusieron las deducciones sobre las leyes que gobiernan la estructura ordenada de los cristales, estas poco pudieron ayudar para responder a una pregunta fundamental: ¿qué forma tienen las moléculas que están en los cristales?, o en definitiva, ¿qué posiciones ocupan los átomos dentro de un cristal? ¡Desgraciadamente, los microscopios ópticos y la luz visible no permitían ver detalles tan pequeños como se imaginaba que eran los átomos!

¿UNA LUZ CAPAZ DE DEJARNOS VER EL INTERIOR DE LOS CRISTALES?

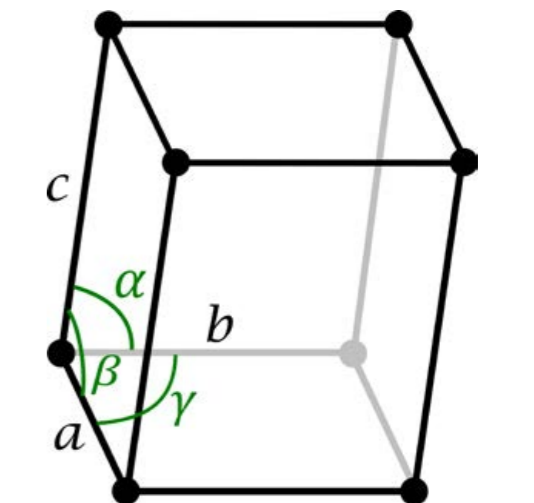
Una extraña luz (los rayos X) descubierta fortuitamente en 1895 por Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) vino a desatacar la respuesta a la pregunta mencionada. En 1912, Max von Laue (1879-1960), decidido a comprobar la posible naturaleza ondulatoria de esta nueva radia-



A.



B.



C.

A) Apilamiento de celdillas elementales idénticas, que imaginó el abate Haüy para describir los cristales.

B) Una flor mostrando sus elementos de simetría: planos de simetría que dividen cada pétalo por la mitad y un eje rotación de orden 6.

C) Uno de los modos de repetición por translación.

Imágenes cedidas por el autor.

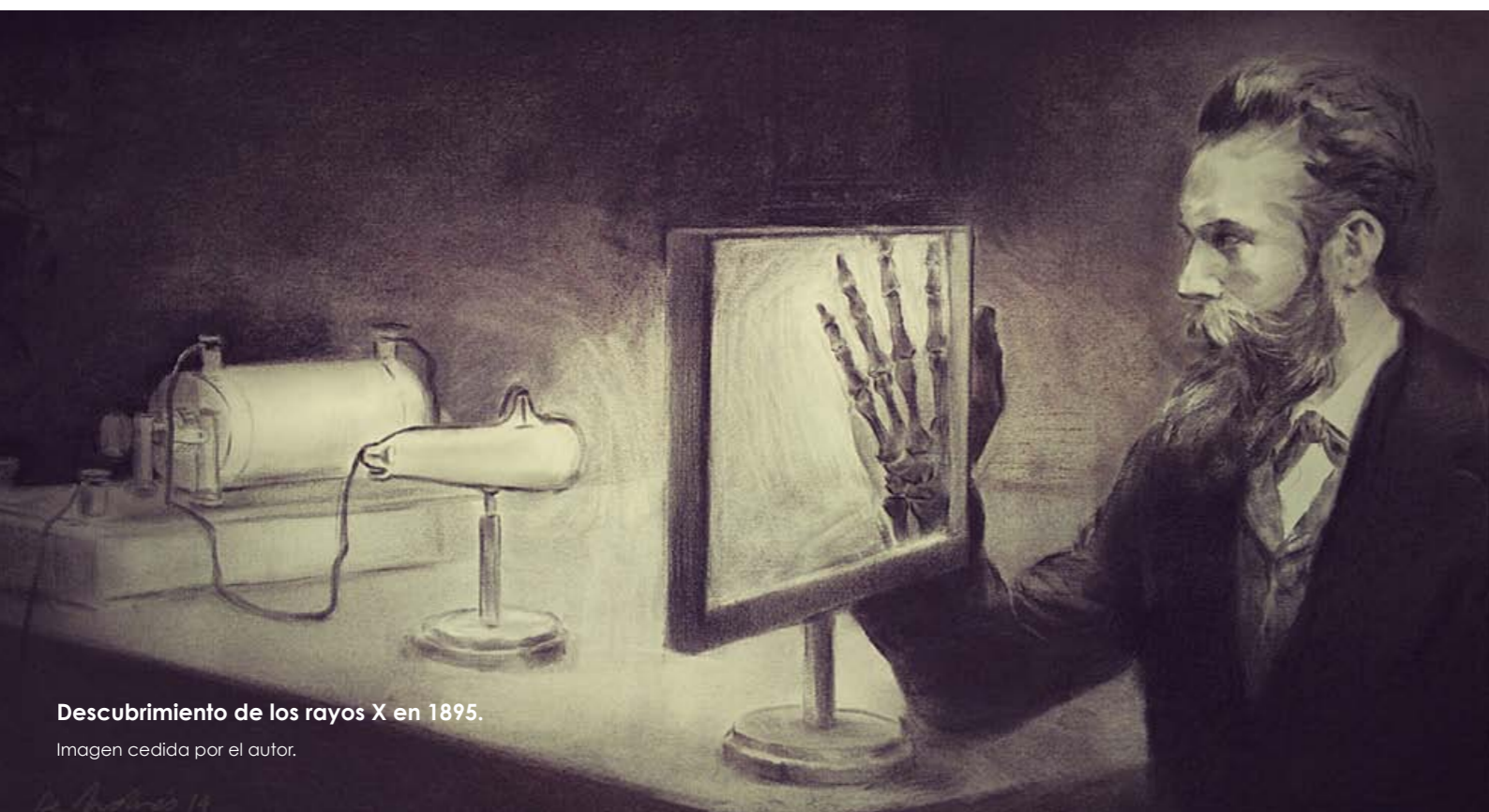
Átomos y moléculas de cristal

ción, tomó la decisión de irradiar un cristal de sulfato de cobre con rayos X, y cuál no sería su asombro cuando se dio cuenta de que con su experimento había "matado dos pájaros de un tiro". En efecto, tras comprobar que la placa fotográfica expuesta se impresionaba no solo en su centro, sino también en determinadas zonas alejadas del mismo, pudo deducir que: a) los rayos X son ondas, radiaciones electromagnéticas, de la misma naturaleza que la luz visible, aunque con distinta longitud de onda, y que b) los cristales se comportan como rendijas de difracción, con dimensiones equivalentes a la longitud de onda de los rayos X.

En ese mismo año, las observaciones de Laue fueron "cogidas al vuelo" por William Lawrence Bragg (1890-1971) y por su padre William Henry Bragg (1862-1942). Ambos investigadores se dieron cuenta de que la verdadera importancia del experimento de Laue emanaba del hecho de que debería ser posible "desandar el camino de la difracción", es decir, deducir la estructura interna de los cristales a partir del estudio del patrón de difracción. En efecto, con su teo-

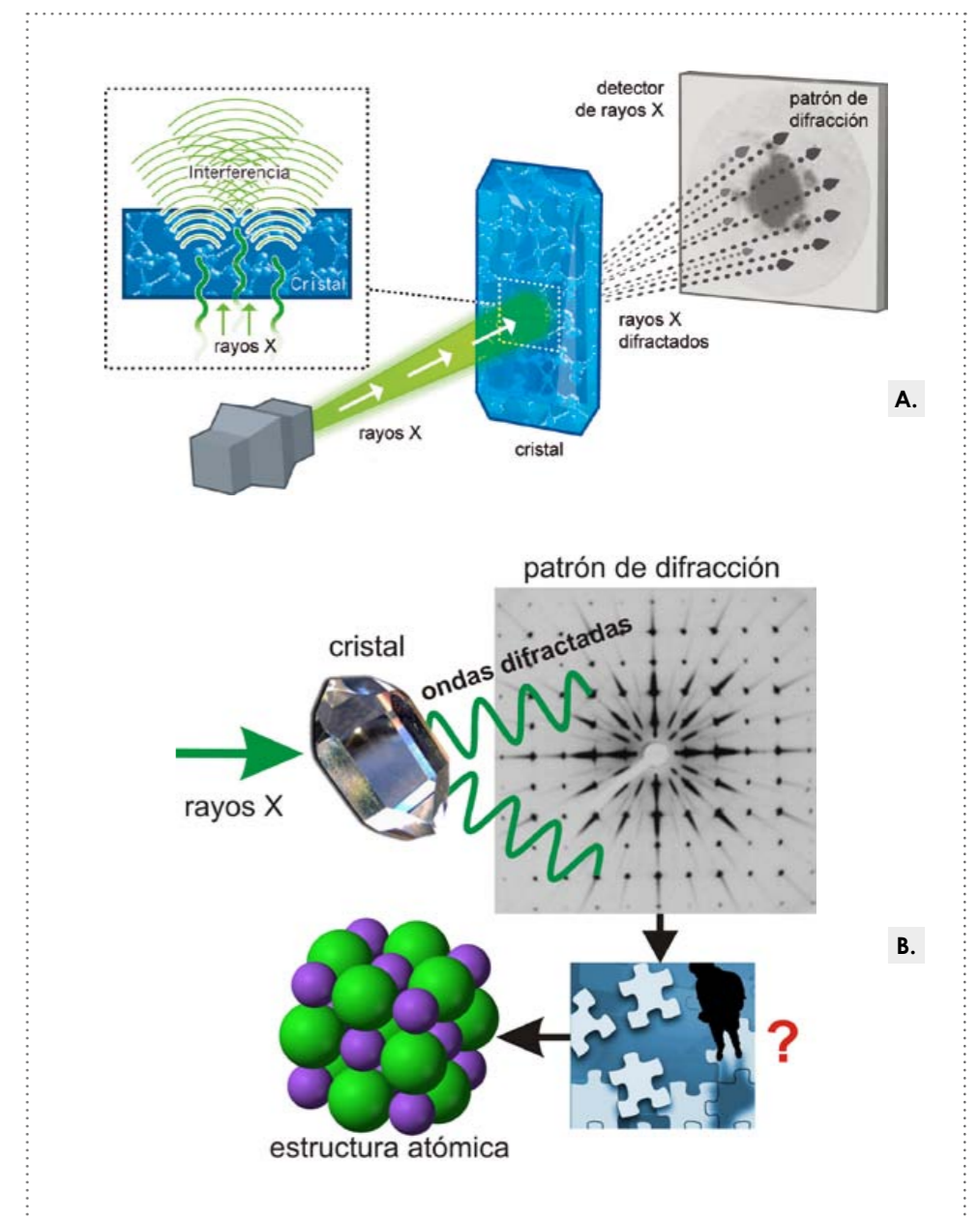
ría fueron capaces de averiguar la estructura atómica de materiales sencillos como el cloruro sódico (sal común) o el mineral blenda (sulfuro de cinc). El descubrimiento de los Bragg supuso ya en aquellos años una revolución científica, pues conocer la estructura íntima de la materia significaba poder desvelar los misterios del mundo que nos rodea. Sin embargo, las grandes expectativas que se crearon pronto sufrieron un cierto frenazo.

Cuando las ondas de los rayos X pasan por el interior de los cristales, se difractan por los átomos, interfieren unas con otras y dan lugar a nuevas ondas resultantes, que cuando chocan con una placa fotográfica, o un detector, generan una especie de fotografía que, como una huella digital, es característica de cada especie cristalina. Esa huella digital, caracterizada por las ondas difractadas, es consecuencia de la situación de los dispersores en el cristal, es decir, de las posiciones atómicas. Por lo tanto, parece razonable que para proceder a la inversa, es decir, para poder deducir las posiciones atómicas a partir del patrón de difracción necesi-



Descubrimiento de los rayos X en 1895.

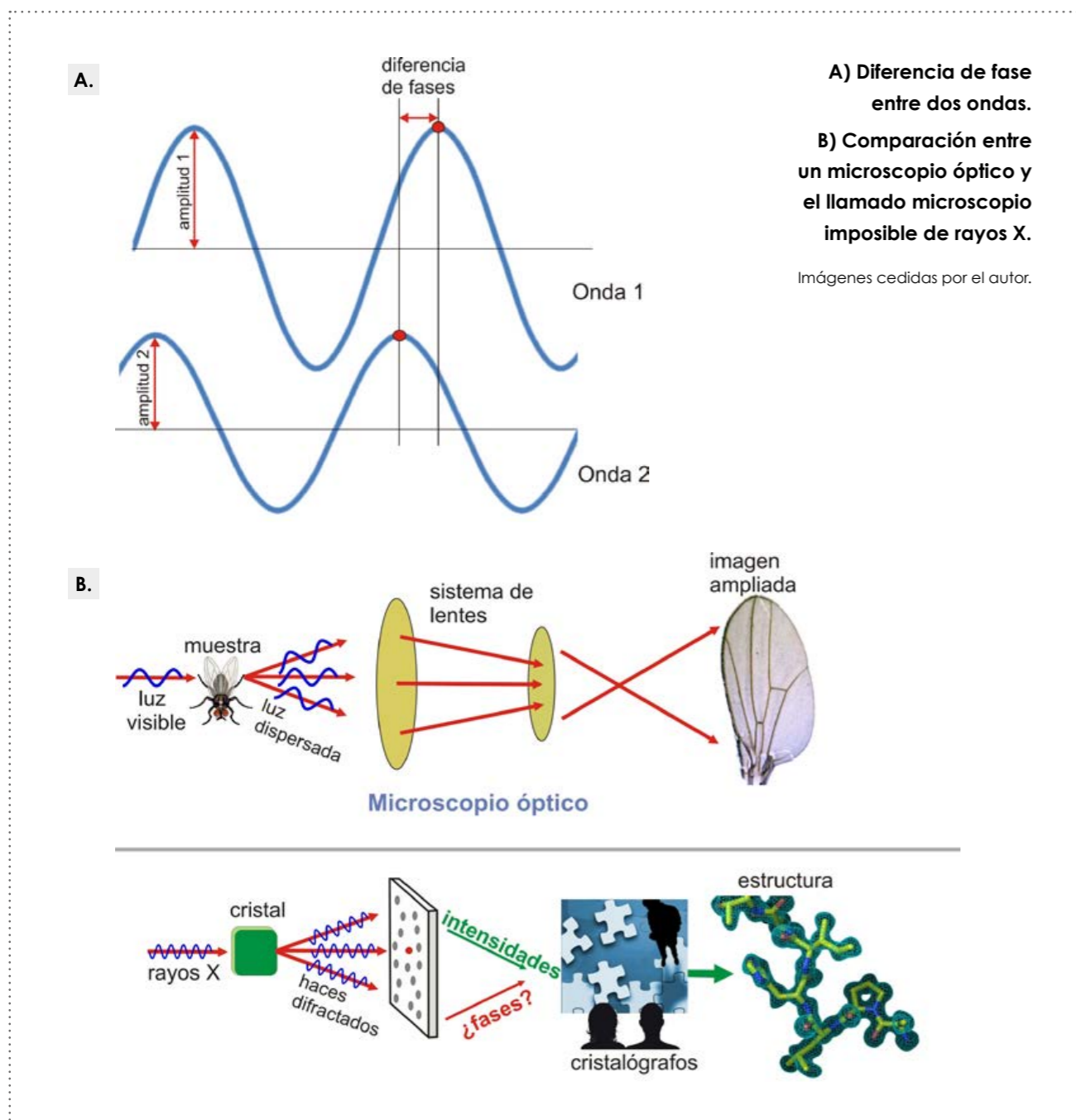
Imagen cedida por el autor.



haremos conocer la información que transporta cada onda difractada. Dicha información es doble, por una parte sus intensidades o amplitudes (perfectamente medibles a través del grado de ennegrecimiento sobre la placa fotográfica), pero por otra están las llamadas fases relativas de cada onda respecto de las demás. Y este es el grave problema que los Bragg ya reconocieron, pues no disponemos de procedimientos para observar las fases relativas de cada onda difractada. De ahí que determinar las posiciones atómicas en un cristal, es decir,

resolver su estructura interna, se plantee como la resolución de un puzzle de muchísimas piezas y al cual le falta información imprescindible en cada una de los fragmentos a encajar.

Para entender mejor el problema que se plantea al intentar resolver la estructura interna de un cristal, resulta muy ilustrativo recurrir a la similitud que tiene el experimento de la difracción con el fenómeno que ocurre en el interior de un microscopio óptico, cuando intentamos observar los pequeños detalles de



un objeto, ampliando su imagen. Por ejemplo, para analizar los detalles del ala de una mosca, que no podemos ver a simple vista, la colocamos en un portaobjetos que iluminamos con luz visible. La luz que pasa a través del ala se refracta en varias ondas que, con su intensidad y fase relativa, pasan a través de un sistema de lentes que son capaces de combinar esas ondas (con sus intensidades y sus fa-

ses), dando lugar a una imagen ampliada que muestra los detalles de lo que estamos observando. Pues bien, en lo que podríamos denominar "el microscopio imposible de rayos X", el objeto a observar es un cristal que se ilumina con rayos X, en lugar de luz visible. Los haces de "luz X" se difractan a través del cristal, pero el problema surge porque no disponemos de un sistema de lentes capaces de combinar

“El camino recorrido por la Cristalografía ha sido largo, pero vertiginoso desde hace un centenar de años”.

las ondas de rayos X (con sus intensidades y sus fases). Nos hemos de conformar con medir solo sus intensidades. Por lo tanto, la solución al puzzle que aludíamos más arriba es precisamente el cálculo de las fases de las ondas difractadas. Por suerte, el problema normalmente se puede resolver usando múltiples aproximaciones y estrategias, pero no es de solución inmediata, y es tanto más complicado cuanto más complejo sea el modelo atómico/molecular a resolver. En cualquier caso, las respuestas a este problema sobrepasan por mucho la intención de este resumen.

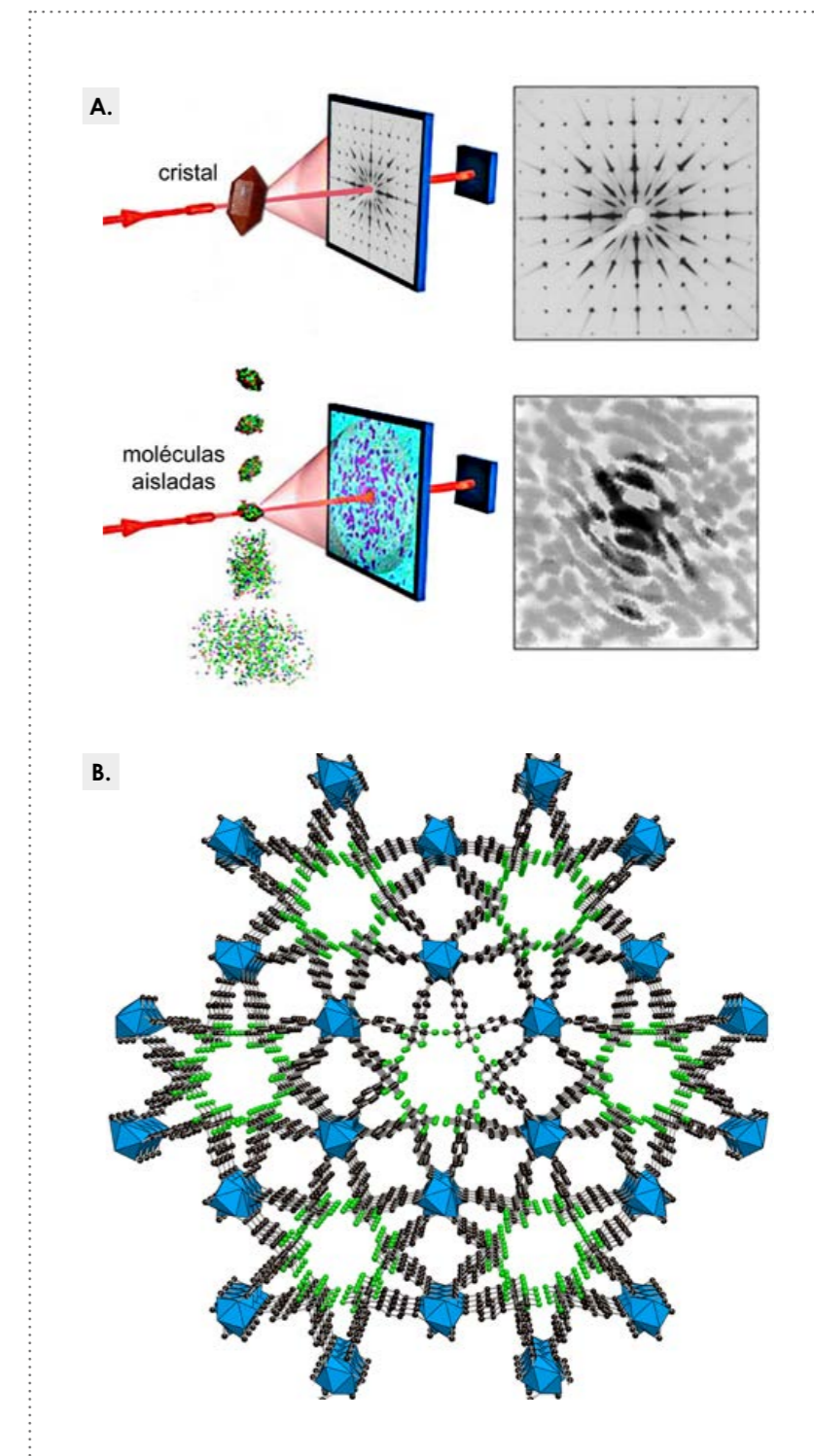
PERO, ¿POR QUÉ USAMOS CRISTALES Y NO MOLÉCULAS AISLADAS?

Muy probablemente, algunos lectores que hayan llegado hasta aquí se habrán preguntado por qué la Cristalografía ha tenido tanto éxito y por qué estamos utilizando cristales (moléculas empaquetadas) para ver los átomos, en vez de utilizar moléculas aisladas.

A) El resultado de la interacción de los rayos X con moléculas ordenadas en el interior de un cristal es mucho más informativo que el proporcionado por una única molécula.

B) Estructura de RPF-4, un material poroso metal-orgánico, (Inorg. Chem. 2009).

Imágenes cedidas por el autor.



La respuesta es muy simple. La interacción de los rayos X con la materia es muy débil y, si iluminamos con rayos X una molécula aislada, obtenemos un patrón de interferencias que contiene una información pobre y poco definida, por lo que resulta difícil recomponer la estructura de las moléculas a partir de dichas interferencias.

Sin embargo, cuando los rayos X inciden sobre un cristal, el empaquetamiento ordenado de las moléculas hace que el cristal se comporte como un potente amplificador de las interferencias que se generan, dando lugar a lo que denominamos ondas difractadas. El patrón de difracción resultante contiene información mucho más rica que el provocado exclusivamente por la interacción con una molécula aislada.

¿QUÉ INFORMACIÓN CONTIENE LA ESTRUCTURA DE UN CRISTAL?

A pesar de que el problema de la evaluación de las fases relativas de las ondas difractadas sigue siendo la piedra angular de la Cristalografía, con el paso de los años esta ciencia ha permitido resolver infinitos puzles y responder a una infinidad de preguntas fundamentales sobre la estructura de la materia viva o inanimada.

Gracias al conocimiento que nos proporciona la Cristalografía, hoy somos capaces de producir materiales con propiedades prediseñadas, desde catalizadores para una reacción química de interés industrial, hasta pasta de dientes, placas de vitrocerámica, materiales de gran dureza para uso quirúrgico, o determinados componentes de los aviones, por poner algunos ejemplos. Más aún, la Cristalografía nos proporcionó los secretos del ADN, el llamado código genético. El diseño de fármacos está basado en el conocimiento de las estructuras. Hoy podemos aumentar la resistencia de las plantas frente al deterioro medioambiental. Somos capaces de comprender, modificar o inhibir, enzimas implicados en procesos fundamentales de la vida e importantes para mecanismos de señalización que ocurren en el interior de nuestras células, como el cáncer. Gracias al conocimiento de la estructura del ribosoma, la mayor fábrica de proteínas de nuestras células, podemos entender el funcionamiento de los antibióticos y modificar su estructura para mejorar su eficacia. De la estructura de enzimas, producidos por ciertos virus, hemos aprendido cómo combatir bacterias con alta resistencia a antibióticos, y ya somos capaces de desentrañar las sutiles maquinarias de defensa que han

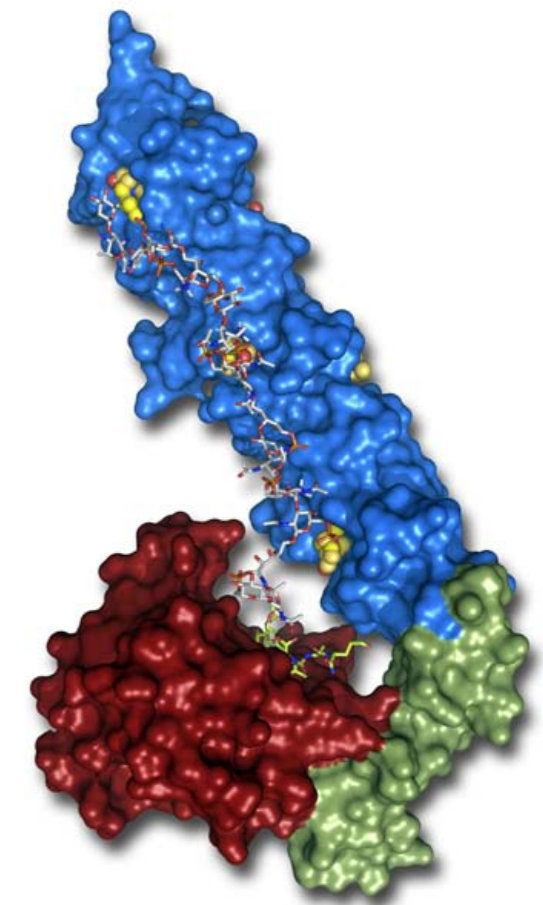
desarrollado estos gérmenes, con lo que no es un sueño pensar que podremos combatirlos con herramientas alternativas a los antibióticos.

¿UN CAMINO DE ROSAS?

El camino recorrido por la Cristalografía ha sido largo, pero vertiginoso desde hace un centenar de años. No en vano, para celebrar el centenario del experimento de Laue, la ONU declaró 2014 *Año Internacional de la Cristalografía*. Y aunque la trayectoria de esta ciencia ha estado salpicada de claroscuros, su historia está plagada de grandes descubrimientos. Desde que Röntgen descubriera fortuitamente los rayos X, Laue los caracterizara haciéndolos difractar a través de los cristales, y los Bragg descubrieran que el fenómeno de la difracción podía ser usado para determinar la estructura interna de los cristales, la Cristalografía ha proporcionado hasta un total de 29 Premios Nobel.

En España la influencia de la Cristalografía ha sido espectacular. Con el esfuerzo de muchos se ha conseguido el establecimiento de excelentes grupos de especialistas en esta disciplina científica, cuya relevancia está fuera de toda duda. Sin embargo, formando parte de los claroscuros aludidos, al contrario de lo que ha ocurrido (y ocurre) en otros países desarrollados, la Cristalografía en España, y especialmente en el mundo académico, parece seguir siendo (salvo excepciones) una asignatura pendiente, quizá porque, erróneamente, ya es considerada como una técnica menor, de aplicación trivial e interpretación baladí.

Como contrapunto del mencionado descuido es necesario aplaudir las iniciativas que los cristalógrafos que trabajan en España llevan a cabo con el título de *Cristalización en la Escuela*, unas experiencias que, auspiciadas por la UNESCO en 2014 (<http://bit.ly/1Jpfja0>), suponen una guía didáctica para alumnos y profesores, como una introducción al apasionante mundo de los cristales.



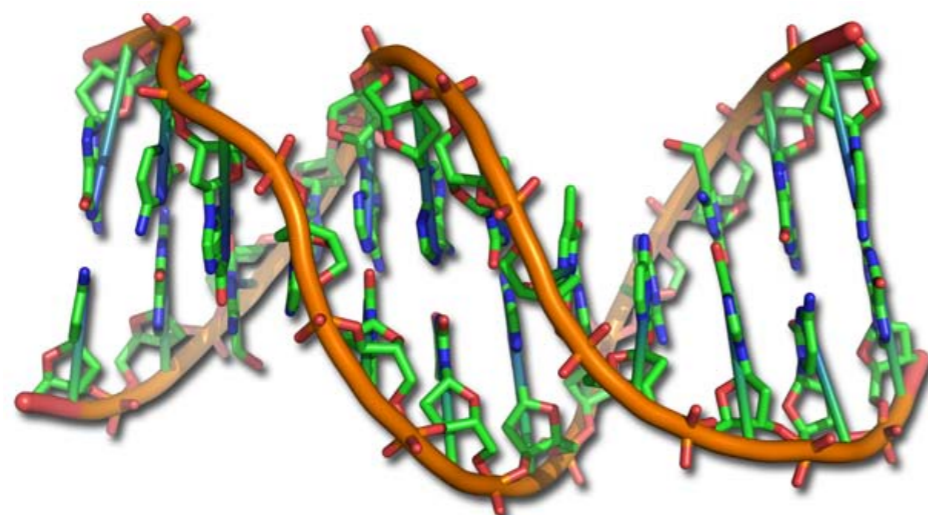
Estructura molecular de LytC, un enzima de la bacteria *Streptococcus pneumoniae*, unida a un fragmento de peptidoglicano (cadenas de péptidos y azúcares que sustentan la pared celular de la bacteria).

Imagen cedida por el autor.

Adicionalmente remitimos al lector a la consulta de una web dedicada a la divulgación de la Cristalografía, (<http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia>), y en concreto al capítulo titulado "En pocas palabras...". Allí, junto a más de un millar de visitantes diarios, encontrará la información que por falta de espacio se omite en este relato. Alternativamente, si le resulta más agradable el contacto con el papel, le remitimos a un ensayo titulado "A través del cristal. Cómo la cristalografía ha cambiado la visión del mundo" [CSIC-Catarata (2014), 196 págs., ISBN: 978-84-00-09800-1].

Martín Martínez-Ripoll

Dpto. de Cristalografía y Biología Estructural
Instituto de Química Física "Rocasolano"
CSIC



La determinación de la estructura en doble hélice del ADN fue un logro de la cristalografía.

Imagen cedida por el autor.

EL PALEO- MAGNETISMO Y EL VIEJO GEÓLOGO

“Los cambios de polaridad magnética se han repetido numerosas veces a lo largo de la historia de la Tierra, y los sucesivos periodos de campo magnético normal e inverso, denominados crones, han quedado registrados en las rocas”.

**POR GONZALO PARDO,
FRANCISCO JAVIER PÉREZ
Y CONCEPCIÓN ARENAS**



Muestreando una serie lutítica para magnetoestratigrafía.

Bógalo et al., 2015

El Paleomagnetismo y el viejo geólogo

El viejo geólogo que esto cuenta sabe muy poco de la Física del magnetismo o del Paleomagnetismo, o de los métodos y tecnologías de uno y otro, pero desde su infancia tuvo encuentros y hasta encontronazos con ellos. Aquí los va a recordar y, como otro abuelo Cebolleta, intenta relatárselos a quien tenga ánimo para seguir leyendo.

Su primera relación con el magnetismo fue una pequeña brújula, único recuerdo que conservaba su abuelo materno de los tiempos en que, por su profesión de carabinero (cuerpo de guardias de fronteras eliminado en 1940 por su fidelidad a la República durante la guerra civil), debía orientarse entre las boiras del Pirineo. El hoy viejo geólogo era entonces tan pequeño como testarudo, y se empeñó en que "aquello" (¿qué imaginaría que era?) funcionaba mal; quizá encontraba su aguja excesivamente

oscilante. Total, que la desmontó, no se sabe cómo, y se llevó la gran sorpresa al ver que debajo del círculo blanco con números, donde esperaba encontrar el misterio de su funcionamiento, ¡no había maquinaria alguna!

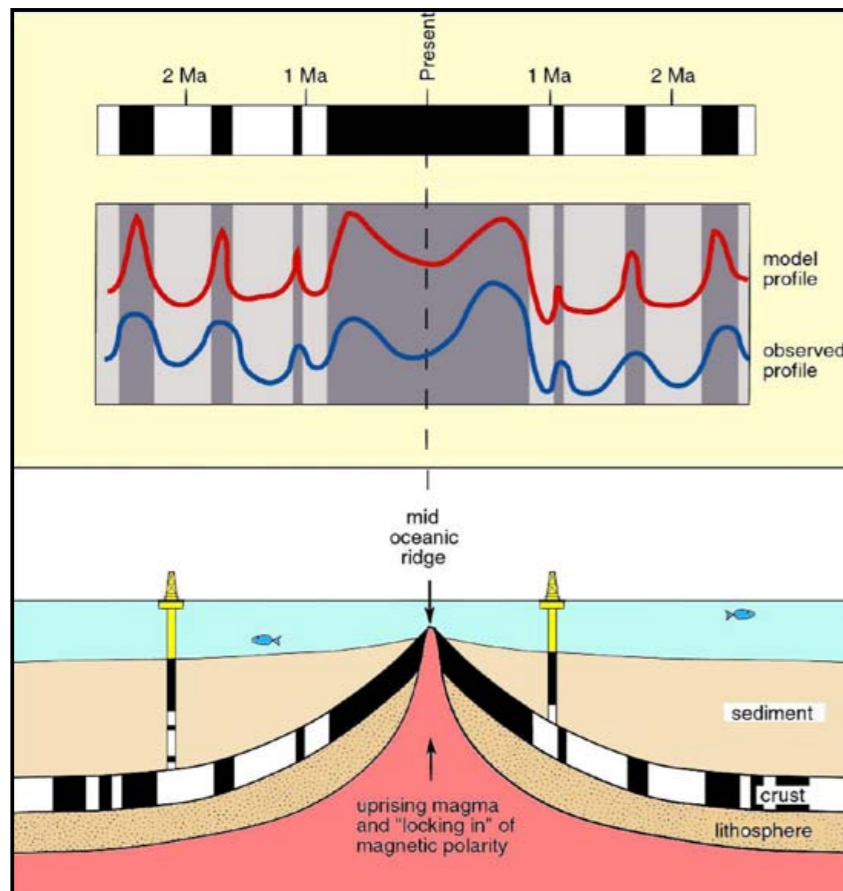
Unos años más tarde, cuando ya conocía "el mecanismo" que hacía funcionar la brújula, lo llevaron a Lourdes (de donde sospecha que volvió igual) y en una tienda de *souvenirs* le ofrecieron elegir un recuerdo: ¿Medalla o llavero? Llavero ¿Con una imagen o un paisaje del santuario? No, con una brújula... Y aquella casi miniatura, única en la tienda, fue la sustituta de la desmontada de su abuelo... ¿qué habrá sido de ambas?

En el bachillerato le enseñaron, entre otras cosas tan olvidadas como el latín y la trigonometría esférica, el triplete corriente/campo/movimiento, y comprendió por qué alumbraban los faroles de las bicicletas de entonces. Años después, en la licenciatura, compró la brújula geológica que aún conserva, y que cuando viaja con ella motiva siempre, no se sabe si por alarma o por simple curiosidad, la revisión de su equipaje en los controles de aeropuerto.

Como estudiante utilizó mucho la brújula para orientar en el espacio estratos, planos de fractura y estrías; sin em-

Nacimiento de litosfera en las dorsales y registro de inversiones magnéticas en la corteza basáltica y en los sedimentos sobre la misma.

Bógalo et al., 2015

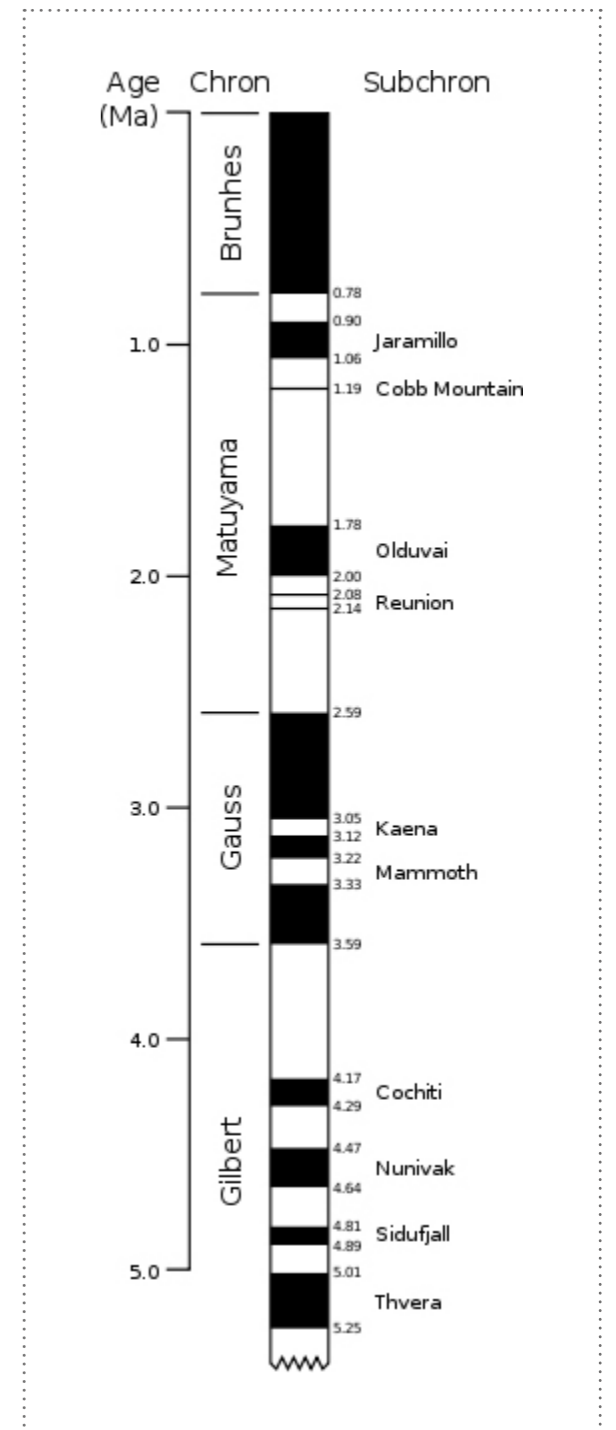


bargo terminó la licenciatura en 1970 sin haber oído hablar de las "brújulas fosilizadas" en las rocas, salvo por el artículo de un holandés (Schwarz, 1964) con el que topó ejerciendo una de sus aficiones de entonces: la búsqueda de datos sobre la geología de su tierra, el Pirineo. En ese trabajo se comparaba el paleomagnetismo de un afloramiento volcánico del valle de Aguas Tuertas con el de rocas de la misma edad en Europa, y se concluía que un área de la litosfera que englobaba los Pirineos se había movido con referencia a Europa, considerada fija, en tiempos post-Triásico.

Para alguien inmerso en la noción de los continentes estáticos, aquello fue un choque. Pero es más, ignoraba que Vine y Matthews, en 1963, estudiando el magnetismo de los fondos oceánicos, habían puesto en evidencia la expansión simétrica de los mismos debido al nacimiento continuo de basaltos en las dorsales, y que con este y otros argumentos acababa de surgir la Teoría de la Tectónica de Placas (Wilson, 1968). Wegener iba a ser reivindicado, y él y todos los geólogos de su generación formados en la tectónica verticalista, tendrían que adaptarse a un paradigma científico nuevo.

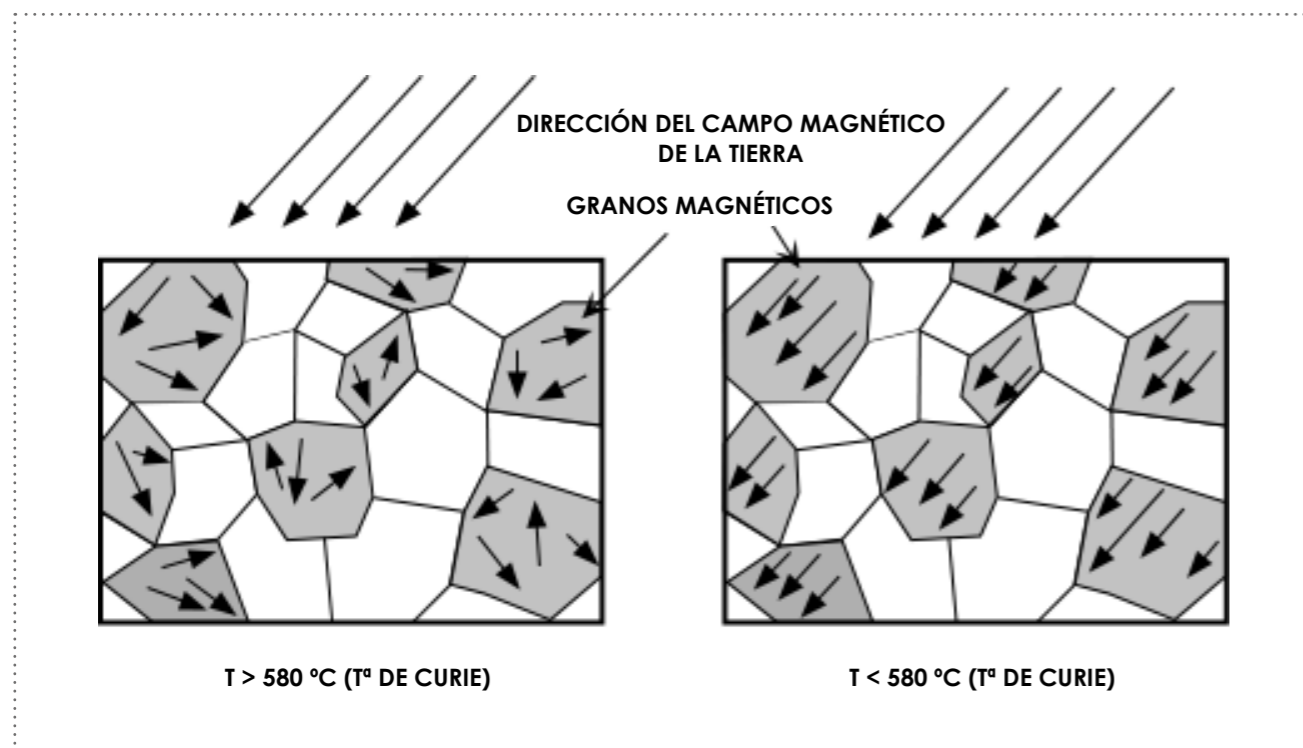
Dentro del campo de la Estratigrafía, que ha sido el universo del viejo geólogo, ha ido cobrando relevancia una aplicación del paleomagnetismo con nombre propio: la Magnetoestratigrafía. De la creciente importancia de esta disciplina da cuenta su tratamiento en dos libros clásicos de Estratigrafía: en Corrales et al. (1977) se nombra, con cierto escepticismo, como un método de correlación de series estratigráficas que se despacha con diez líneas; en cambio Vera (1994) le dedica ya un capítulo completo.

La Magnetoestratigrafía es una herramienta que se utiliza para datar y correlacionar con precisión sucesiones de estratos. Se basa en el registro de las sucesivas inversiones del campo magnético terrestre. La constatación de este fenómeno fue clave para establecer la expansión de los fondos oceánicos, lo que permite reconstruir, cada



Inversiones magnéticas de los últimos millones de años y su edad absoluta. Dentro de los crones se producen inversiones de menor duración, los subcrones.

es.wikipedia.org



Esquema de adquisición de la magnetización remanente térmica de los cristales de magnetita en una roca ígnea. Las flechas dentro de los minerales figuran los momentos magnéticos de los átomos, que se ordenan según el campo externo cuando, por debajo de la temperatura de Curie, la agitación térmica deja de ser la energía dominante.

www.geociencias.unam.mx

vez con mayor precisión, la fragmentación que se viene produciendo desde hace 260 millones de años de una única tierra emergida, la Pangea pérmica. La Magnetoestratigrafía ha ido avanzando con el conocimiento cada vez más preciso de las inversiones del campo magnético y su datación en tiempo absoluto. Así, la combinación de información magnetoestratigráfica, bioestratigráfica y radiométrica ha permitido el desarrollo de una Escala de Tiempo de Polaridad Geomagnética (GPTS en siglas inglesas) cuya versión más avanzada, por el momento, es la de 2012 de Grandstein et al. La parte de la GPTS correspondiente al Neógeno y al Triásico superior ha sido astronómicamente calibrada, ajustando el registro sedimentario a los ciclos orbitales.

El campo magnético actual, con las líneas de fuerza desde el polo sur hacia el polo norte, se denomina normal y existe desde hace 780.000 años. El cambio a un campo con las líneas de fuerza invertidas (polaridad inversa) es un proceso global que, al menos en apariencia, se da de forma aleatoria, pero con suficiente rapidez (pocos miles de años) como para ser considerado instantáneo a la escala del tiempo geológico. Los cambios de polaridad magnética se han repetido numerosas veces a lo largo de la historia de la Tierra, y los sucesivos periodos de campo magnético normal e inverso, denominados *crones*, han quedado registrados en las rocas de varias formas:

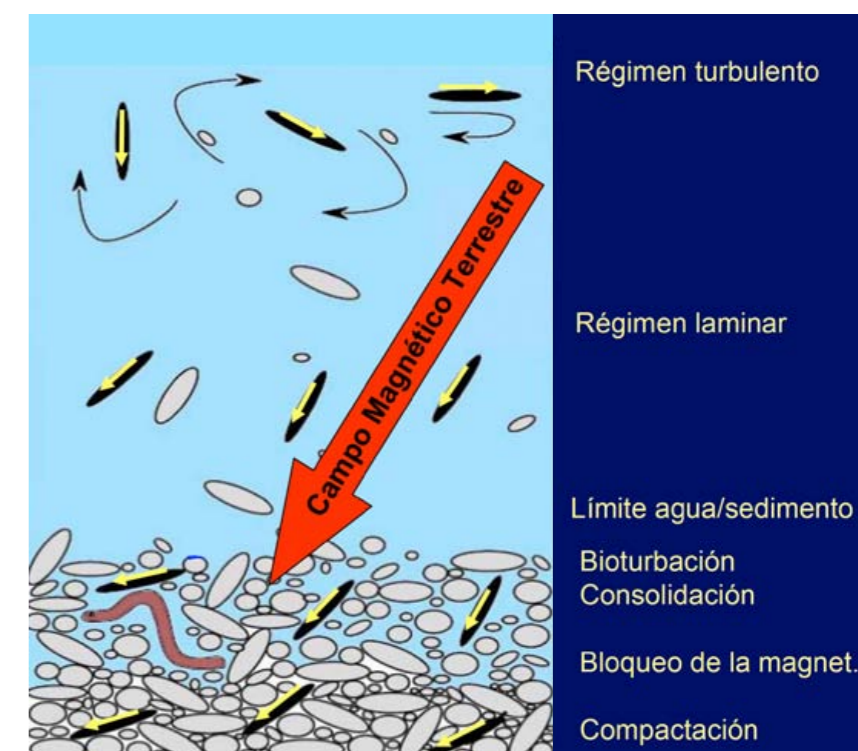
- En las rocas ígneas, los minerales magnéticos que se forman durante el enfriamiento del magma (magnetita y titanomagnetita mayoritariamente) se orientan según el campo magnético existente cuando la temperatura desciende por debajo del *punto de Curie*, propio de cada mineral, y fijan esta orientación a una temperatura ligeramente inferior, denominada *temperatura de bloqueo*. Esta forma de adquisición de magnetismo se denomina *magnetización remanente térmica*. La formación continua de corteza en las dorsales medio-oceánicas es el mejor registro de las inversiones del campo magnético. Además, la anchura de cada banda de polaridad magnética en los fondos oceánicos permite calcular la velocidad de expansión a lo largo del tiempo en cada segmento de dorsal. Desgraciadamente, este registro no va más atrás del Jurásico, porque la corteza oceánica más antigua ha sido destruida en las zonas de subducción, directamente relacionadas con las fosas oceánicas.

- Entre los sedimentos que se están depositando en una cuenca se encuentran minerales ferromagnéticos procedentes de la erosión de rocas preexistentes. Los granos de estos minerales se comportan como agujas imantadas, y preferentemente se orientan según el campo magnético actuante en el momento de su depósito. En este caso se habla de *magnetización remanente detrítica*. Si en una cuenca se puede reconstruir un registro sedimentario continuo, se conservará también el registro de las inversiones magnéticas que han tenido lugar durante el tiempo de vida de esa cuenca, y se podrán calcular las tasas de sedimentación a lo largo del relleno.

“El campo magnético actual, con las líneas de fuerza desde el polo sur hacia el polo norte, existe desde hace 780.000 años”.

Esquema de adquisición de la magnetización remanente detrítica en los sedimentos de una cuenca.

Bógalo et al., 2015



El Paleomagnetismo y el viejo geólogo

Estas son formas de adquisición de una magnetización primaria. Pero además existen magnetizaciones secundarias que habitualmente interfieren con las primarias antes citadas. Las más comunes son, en primer lugar, la *magnetización remanente química* que se produce cuando en una roca se forman minerales ferromagnéticos nuevos por alteración de los preexistentes, por precipitación a partir de disoluciones, o incluso por acción bacteriana; se trata de una magnetización que, si se produce con posterioridad al depósito, puede registrar una polaridad distinta a la adquirida primariamente. Además, la mayoría de las rocas presentan una *magnetización remanente viscosa*, gradualmente ad-

quirida por la continuada exposición al campo magnético actual. Excepcionalmente, una roca puede verse sometida a los efímeros pero potentes campos magnéticos de los impactos de rayos, y de esta forma adquirir una *magnetización remanente isoterma*. A la suma del magnetismo primario de una roca y de todas las componentes magnéticas que haya podido adquirir tras su formación se la denomina *magnetización remanente natural*.

La teoría es relativamente simple, pero su aplicación práctica no lo es, y el trabajo magnetoestratigráfico es arduo, complejo y requiere minuciosidad y grandes dosis de perseverancia. Al inicio precisa un muestreo físicamente exigente, por cuanto hay que moverse por terrenos abruptos con una taladradora eléctrica o de gasolina refrigeradas con agua, que hay que acarrear en bidones; con mucha frecuencia es necesario excavar para alcanzar la roca inalterada y, por descontado, orientar rigurosamente las muestras (unos cilindros de roca extraídos mediante brocas huecas con corona de diamante), puesto que finalmente se trata de medir vectores de imantación. En fin, que el magnetoestratígrafo termina esta fase de trabajo en excelente forma física... o necesitado de una cura de balneario.

.....

Trayectoria de desmagnetización de una muestra (línea roja). Cada punto representa el extremo del vector de magnetización resultante tras cada paso de desmagnetización. Su proyección en el plano vertical permite visualizar la inmersión y en el plano horizontal la declinación. Abajo: El plano horizontal se abate para su representación en 2D (diagrama de Zijderveld).

Bógalo et al., 2015



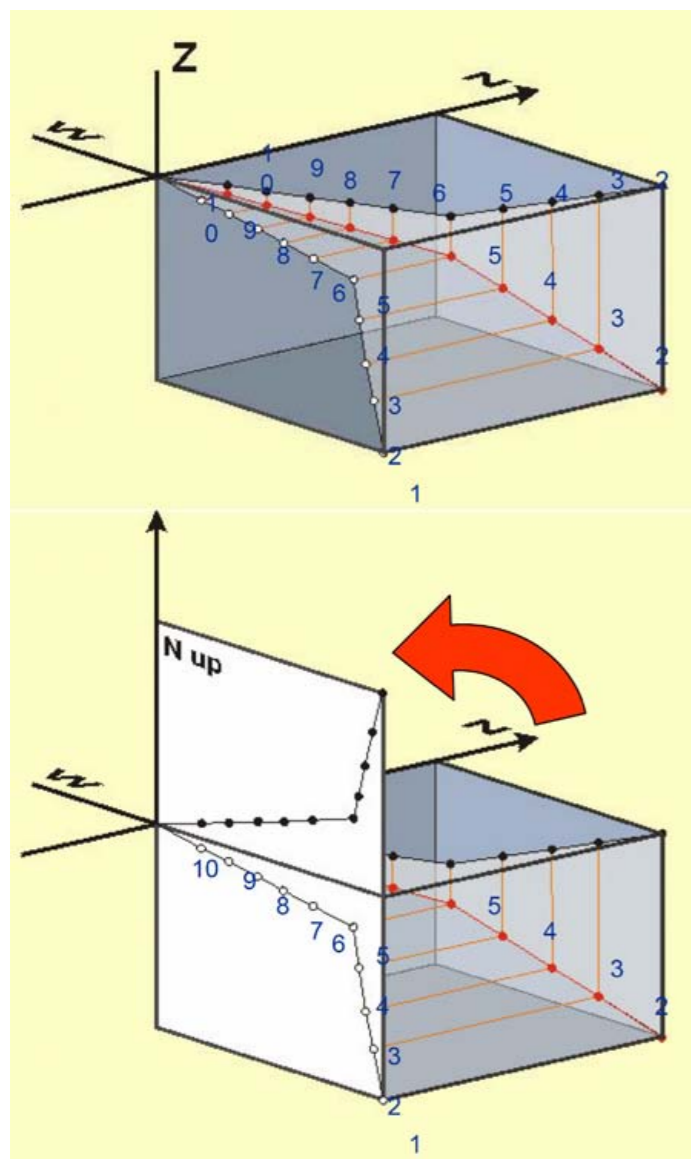
Fragmento de una magnetita.

www.tiendaminerales.com

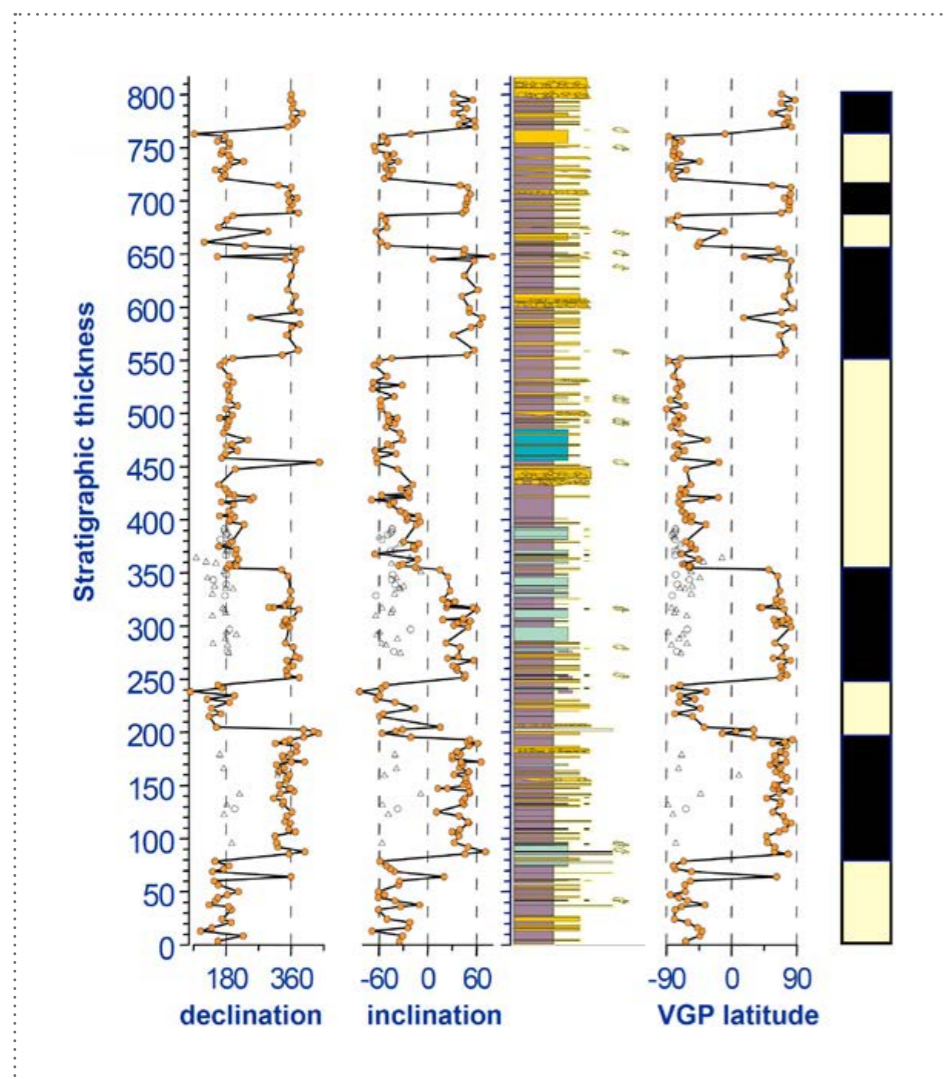
“En las rocas ígneas, los minerales magnéticos (magnetita y titanomagnetita mayoritariamente) se forman durante el enfriamiento del magma”.

Después, en el laboratorio, viene un meticuloso tratamiento de las muestras, para ir eliminando las magnetizaciones secundarias hasta aislar la componente más estable de la magnetización remanente natural, la que se denomina *magnetización remanente característica*. Para ello se procede a seguir rutinas de desmagnetización progresiva utilizando habitualmente dos técnicas diferentes: la de campos alternos, en la que mediante la aplicación de campos magnéticos de amplitud e intensidad variable se van eliminando componentes magnéticas hasta aislar la característica; y la térmica, en que las muestras se someten a calentamiento-enfriamiento en pasos de temperatura ascendente, de forma que se vayan superando las temperaturas de bloqueo de los minerales hasta alcanzar la de los más estables térmicamente, supuestos portadores de la magnetización primaria. Estas rutinas se realizan con la muestra aislada del campo magnético ambiental mediante un blindaje de mu-metal (aleación de muy alta permeabilidad magnética).

Tras cada paso de desmagnetización, la medida de la magnetización residual se realiza mediante magnetómetros igualmente blindados, generalmente criogénicos, es decir, que enfrían el interior con nitrógeno y/o helio líquido hasta unos pocos grados sobre el cero absoluto. En estas condiciones se anulan las vibraciones térmicas que podrían interferir en las medidas, y el aparato, cuyos detectores funcionan como superconductores, es capaz de medir campos magnéticos mínimos.



El Paleomagnetismo y el viejo geólogo



Bógalo et al., 2015

Considérese ahora que para cada muestra se necesitan generalmente más de diez pasos de desmagnetización y que en cada paso hay que medir el campo en el magnetómetro en tres direcciones ortogonales... ¡ay de ti si pretendes acometer la magnetoestratigrafía de una serie de mil metros muestreada metro a metro!... ¿has pensado, aspirante a paleomagnetista o paleomago, cuánta "cocina" tienes por delante? Pues así son ellos y ellas, que también las hay.

Con la interpretación de las trayectorias de desmagnetización se obtiene finalmente el vector de la magnetización remanente característica de cada muestra. Este vector posee una incli-

nación (en el plano vertical) y una declinación (en el horizontal) respecto al polo geográfico. A partir de ellas se calcula un *polo geomagnético virtual*, que se asimila al paleopolo magnético existente cuando la muestra adquirió su magnetización primaria. Si la latitud del polo virtual está próxima a los $+90^\circ$ la polaridad es considerada normal; si es próxima a -90° la polaridad será inversa. A partir de aquí, para saber si realmente se ha llegado a determinar la magnetización primaria, así como el grado de precisión y dispersión de los resultados, el conjunto de las muestras se somete a tratamientos estadísticos y a diferentes tests de estabilidad: otra virtud capital del magnetoestratígrafo debe ser la prudencia.

Si los resultados son fiables según estos tests, el muestreo detallado de una serie estratigráfica permitirá situar en ella, con precisión, las inversiones de polaridad que tuvieron lugar durante el depósito, definiendo una sucesión de *magnetozonas locales* de polaridad normal e inversa.

Pero aún queda correlacionar esta magnetoestratigrafía local, formada por solo dos tipos de términos (gráficamente, normal= negro, inverso= blanco), con la GPTS (igualmente formada por una sucesión de crones normales e inversos), y así datar la serie con precisión y en tiempo absoluto, que es el objetivo perseguido. Para ello primero hay que "anclar" la magnetoestratigrafía local en un intervalo de tiempo determinado mediante alguna referencia independiente de tiempo geológico: dataciones radiométricas y/o biozonas características

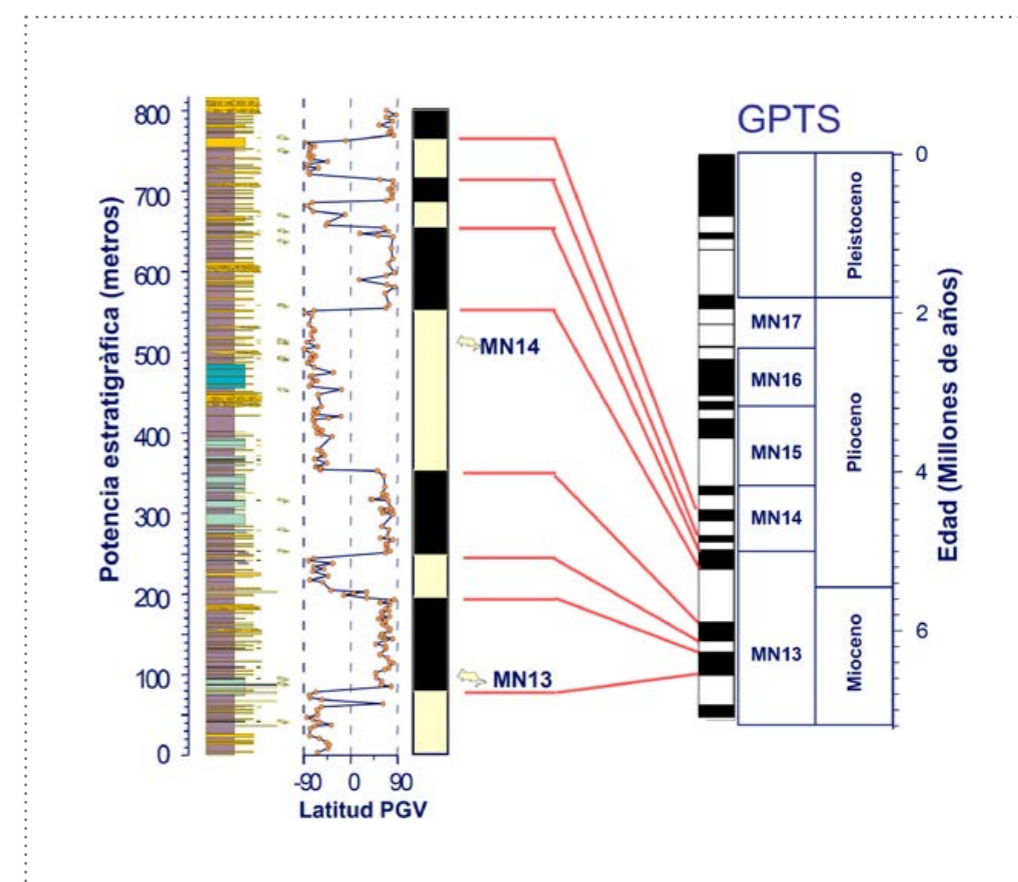
(por ejemplo de foraminíferos planctónicos en el caso de sedimentos marinos, de micromamíferos en sedimentos continentales). Ya solo queda encajar las magnetozonas locales con el patrón de inversiones de la GPTS de ese intervalo de tiempo.

En la figura puede verse uno de esos ajustes. En este caso se ha utilizado un par de yacimientos cuya fauna corresponde a unas determinadas biozonas de micromamíferos del Neógeno (MN). Sabiendo, en el momento del estudio, la situación temporal de esas biozo-

“El Paleomagnetismo tiene hoy excelentes especialistas entre los antiguos alumnos de la Sección de Geológicas de Zaragoza”.

El ajuste de las magnetozonas locales con la GPTS se hace a través del anclaje con algún dato temporal en la columna estratigráfica.

Bógalo et al., 2015



El Paleomagnetismo y el viejo geólogo

nas se busca el mejor ajuste de las magnetozonas locales al patrón de inversiones de la GPTS correspondiente a ese intervalo de tiempo. Asimismo se puede producir un *feedback* de información, como en este ejemplo donde si la atribución de fauna a la biozona MN14 es incuestionable, el límite inferior de esa biozona podría desplazarse a un tiempo anterior al que se la atribuía hasta el momento; esto supondría un perfeccionamiento de la geocronología de las MN.

Al viejo geólogo le llegó el ingreso en el club de la Magnetoestratigrafía por la tenaz implicación de uno de sus antiguos estudiantes y luego colaborador que, tras muchos avatares vitales, ha presentado una tesis doctoral (Pérez Rivarés, 2016) cuya lectura se recomienda a quien quiera profundizar cómodamente en el tema

en un castellano claro. Su trabajo, con más de 1400 m muestreados cada metro, tiene interesantes implicaciones bioestratigráficas (véase Agustí et al., 2011); pero ante todo en él se presenta la datación absoluta de las unidades genéticas del Mioceno establecidas previamente (por ejemplo, Arenas, 1993) a lo largo de un transecto de 200 km que recorre de este a oeste el sector central de la Cuenca del Ebro. Esas unidades genéticas resultan de la aplicación de una metodología, el Análisis Tectosedimentario, que se viene desarrollando en el área de Estratigrafía de la Universidad de Zaragoza desde los años 80, y ya habían sido cartografiadas con el nombre de Unidades tectosedimentarias (UTS) para el conjunto de la cuenca (Muñoz et al., 2002). Pero esto del Análisis Tectosedimentario y de las UTS es una historia diferente, quizás para tratar en otro momento.

Para terminar, hay que señalar que el Paleomagnetismo tiene hoy excelentes especialistas entre los antiguos alumnos de la Sección de Geológicas de Zaragoza, que han contribuido no poco al conocimiento de la cinemática de las estructuras tectónicas del Pirineo y de la Ibérica. Un mérito añadido a estos investigadores es la falta o escasa presencia de infraestructuras al efecto en nuestra universidad, por lo que sus trabajos han supuesto repetidos y largos desplazamientos a otros centros dotados de laboratorios de Paleomagnetismo. A estos centros, siempre receptivos a la colaboración y abiertos a recibirlos (y en algunos casos a quedarlos en sus equipos) nuestro agradecimiento; en el caso de este viejo geólogo el agradecimiento es específicamente para el Laboratorio de Paleomagnetismo CCiT, Universidad de Barcelona-CSIC y para su supervisor científico, Miguel Garcés.

Gonzalo Pardo, Francisco Javier Pérez y
Concepción Arenas

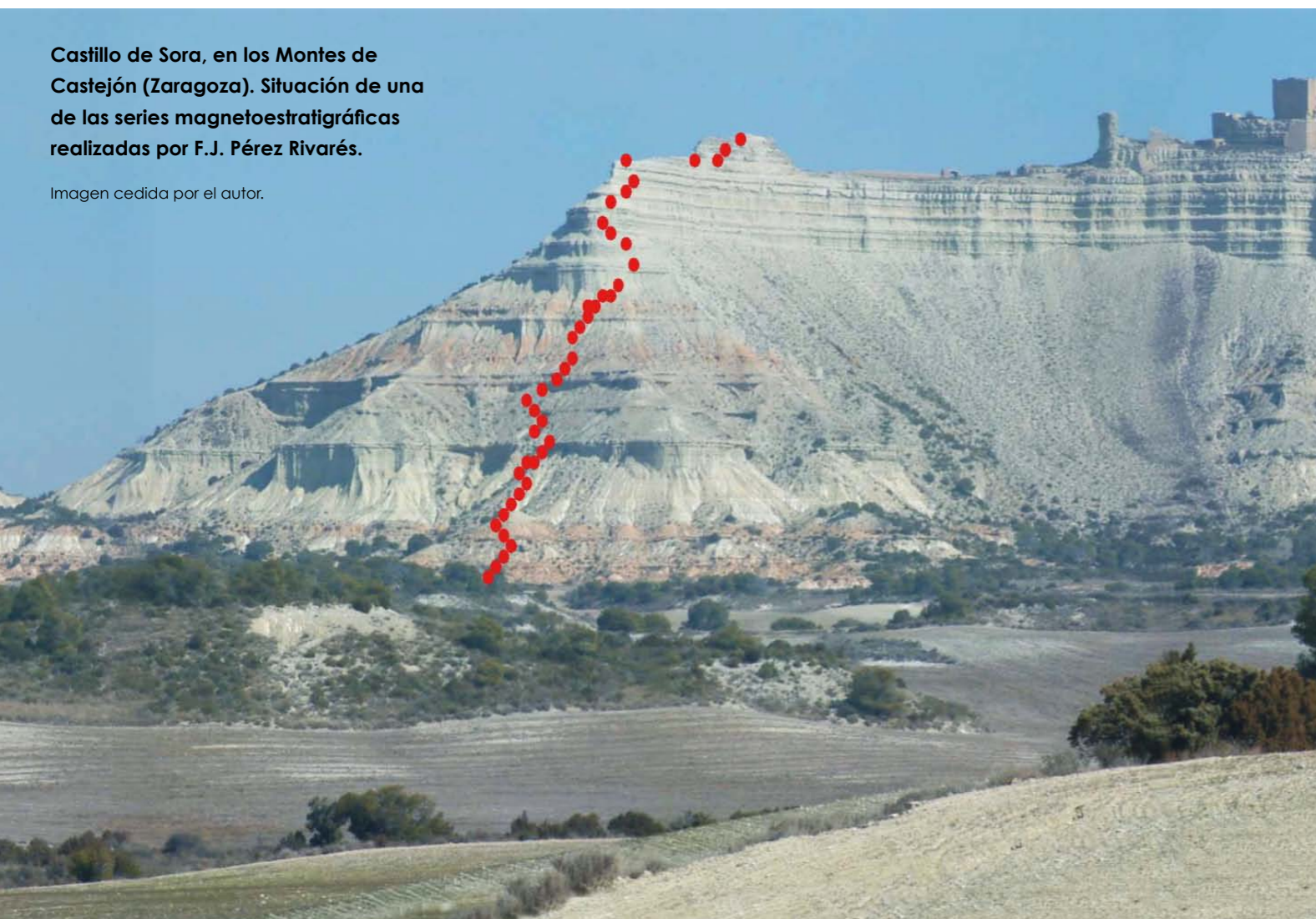
Dpto. de Ciencias de la Tierra
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza

REFERENCIAS

- Agustí J., Pérez-Rivarés F.J., Cabrera L., Garcés M., Pardo G. y Arenas C. (2011). The Ramblian-Aragonian boundary and its significance for the European Neogene continental chronology. Contributions from the Ebro Basin record (NE Spain). *Geobios*, 44, pp 121-134.
- Arenas C. (1993). *Sedimentología y paleogeografía del Terciario del margen pirenaico y sector central de la Cuenca del Ebro (zona aragonesa occidental)*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, pp 858.
- Bógalo M., Calvo M. y Villalaín J. (2015). *Seminario activo sobre técnicas paleomagnéticas y sus aplicaciones*. Documento pdf, Universidad de Burgos, pp 107.
- Corrales I., Rosell J., Sánchez de la Torre L., Vera J.A. y Vilas L. (1977). *Estratigrafía*. Editorial Rueda, Madrid, pp 718.
- Gradstein F., Ogg J., Schmitz M. y Ogg G., editors (2012). *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier, pp 1144.
- Muñoz A., Arenas C., González A., Luzón A., Pardo G., Pérez A. y Villena J. (2002). Ebro basin (northeastern Spain). En: W. Gibbons y T. Moreno (Editores), *The Geology of Spain*. The Geological Society, Londres, pp 301-309.
- Pérez Rivarés F.J. (2016). *Estudio magnetoestratigráfico del Mioceno del sector central de la Cuenca del Ebro: Cronología, correlación y análisis de la ciclicidad sedimentaria*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, pp 281.
- Schwarz E.J. (1962). Geology and paleomagnetism of the valley of the Aragón Subordán north and east of Oza (Spanish Pyrenees, province of Huesca). *Estudios Geológicos*, 18, pp 193-240.
- Vera J.A. (1994). *Estratigrafía. Principios y Métodos*. Editorial Rueda, Madrid, pp 806.
- Vine F.J. y Matthews D.H. (1963) Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199: pp 947-949.
- Wilson J.T. (1968). Static or mobile Earth: the current scientific revolution. *Amer. Philos. Soc. Proc.*, 112: pp 309-320.

Castillo de Sora, en los Montes de Castejón (Zaragoza). Situación de una de las series magnetoestratigráficas realizadas por F.J. Pérez Rivarés.

Imagen cedida por el autor.



Construyendo...

*...el Espacio Europeo
de Educación Superior*



Grado en Biotecnología
Grado en Física
Grado en Geología
Grado en Matemáticas
Grado en Óptica y Optometría
Grado en Química

GRADOS



Máster en Biología Molecular y Celular
Máster en Física y Tecnologías Físicas
Máster en Geología: Técnicas y Aplicaciones
**Máster en Modelización e Investigación Matemática,
Estadística y Computación**
Máster en Investigación Química
Máster en Química Industrial
Máster en Química Molecular y Catálisis Homogénea
**Máster en Nanotecnología Medioambiental
(ENVIRONNANO)**
**Máster en Materiales Nanoestructurados para
Aplicaciones Nanotecnológicas (NANOMAT)**
Máster Erasmus Mundus en Ingeniería de Membranas

MÁSTERES



¡Matricúlate!

ciencias.unizar.es/web

