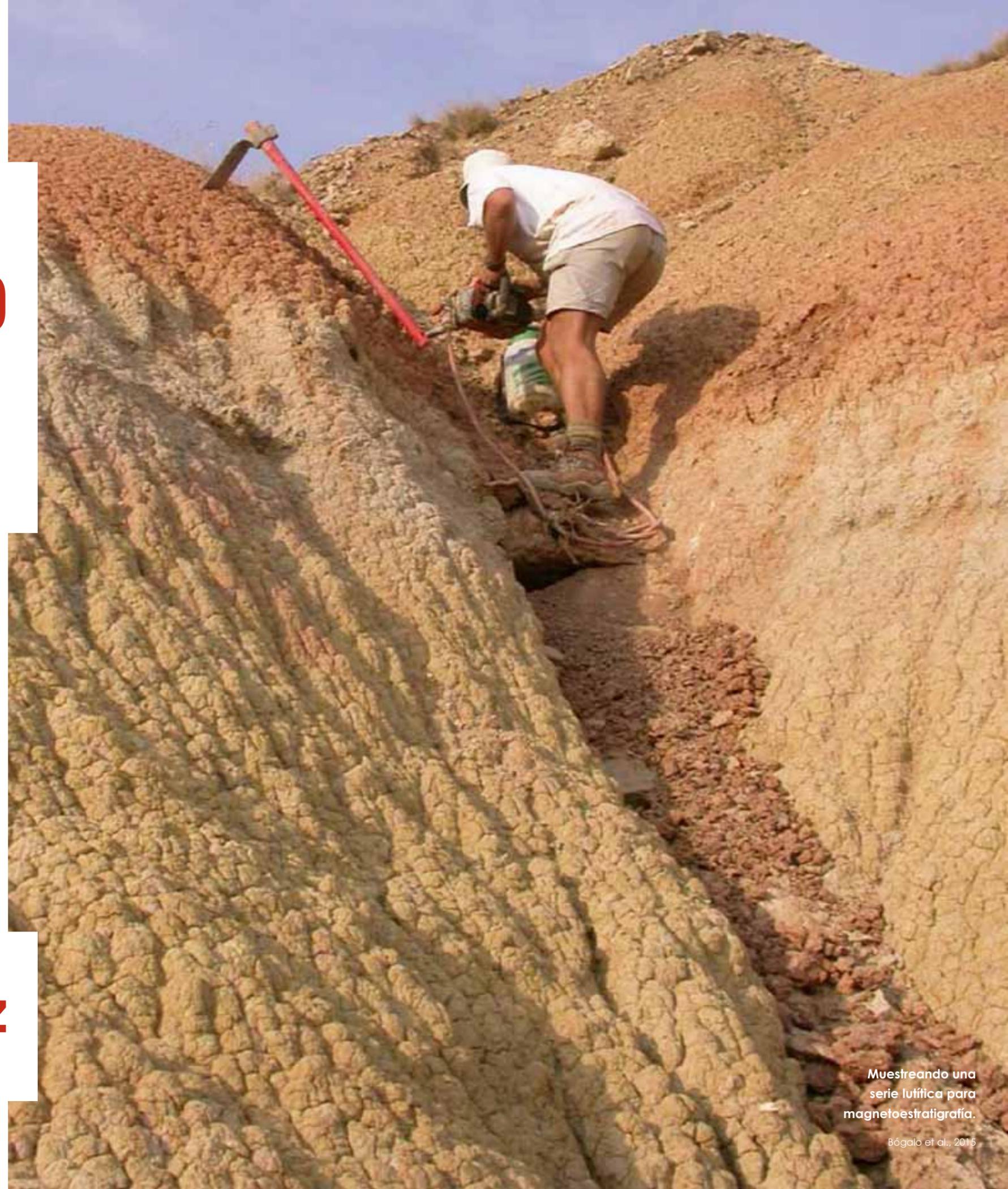


EL PALEO- MAGNETISMO Y EL VIEJO GEÓLOGO

“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!

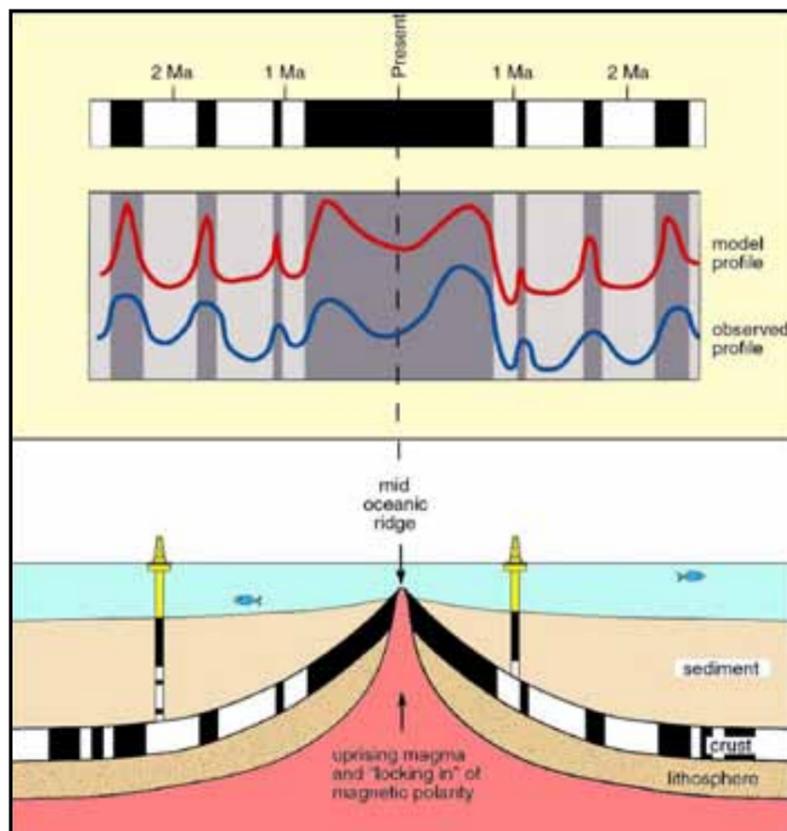
Unos años más tarde, cuando ya conocía "el mecanismo" que hacía funcionar la brújula, lo llevaron a Lourdes (de donde sospecha que volvió igual) y en una tienda de *souvenirs* le ofrecieron elegir un recuerdo: ¿Medalla o llavero? Llavero ¿Con una imagen o un paisaje del santuario? No, con una brújula... 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

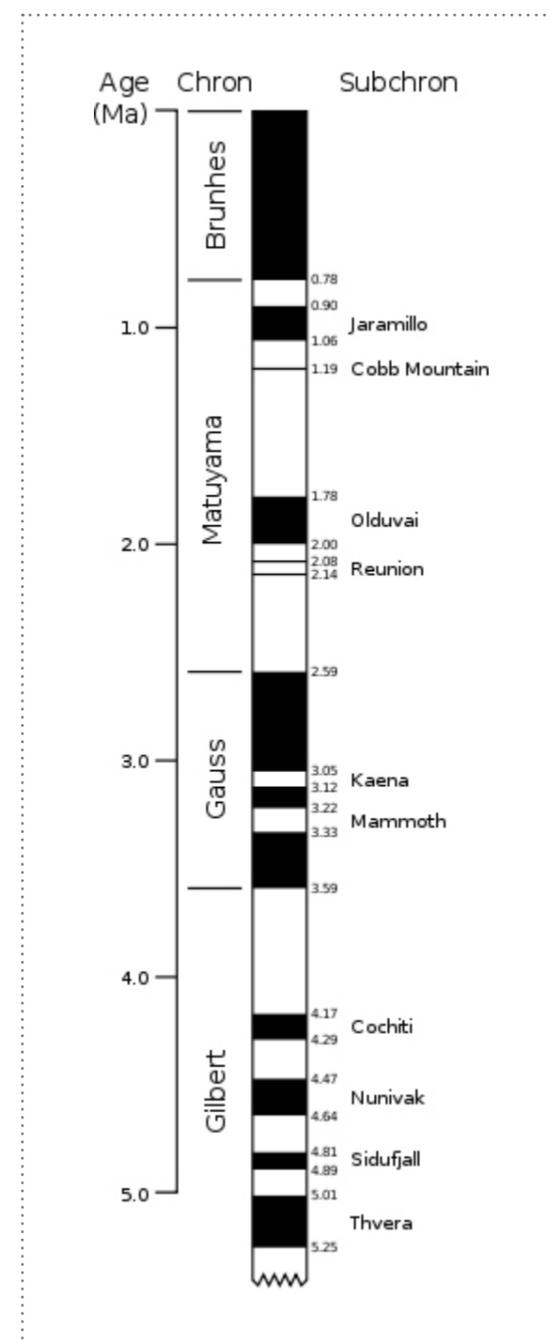


bargo terminó la licenciatura en 1970 sin haber oído hablar de las "brújulas fosilizadas" en las rocas, salvo por el artículo de un holandés (Schwarz, 1964) con el que topó ejerciendo una de sus aficiones de entonces: la búsqueda de datos sobre la geología de su tierra, el Pirineo. En ese trabajo se 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.

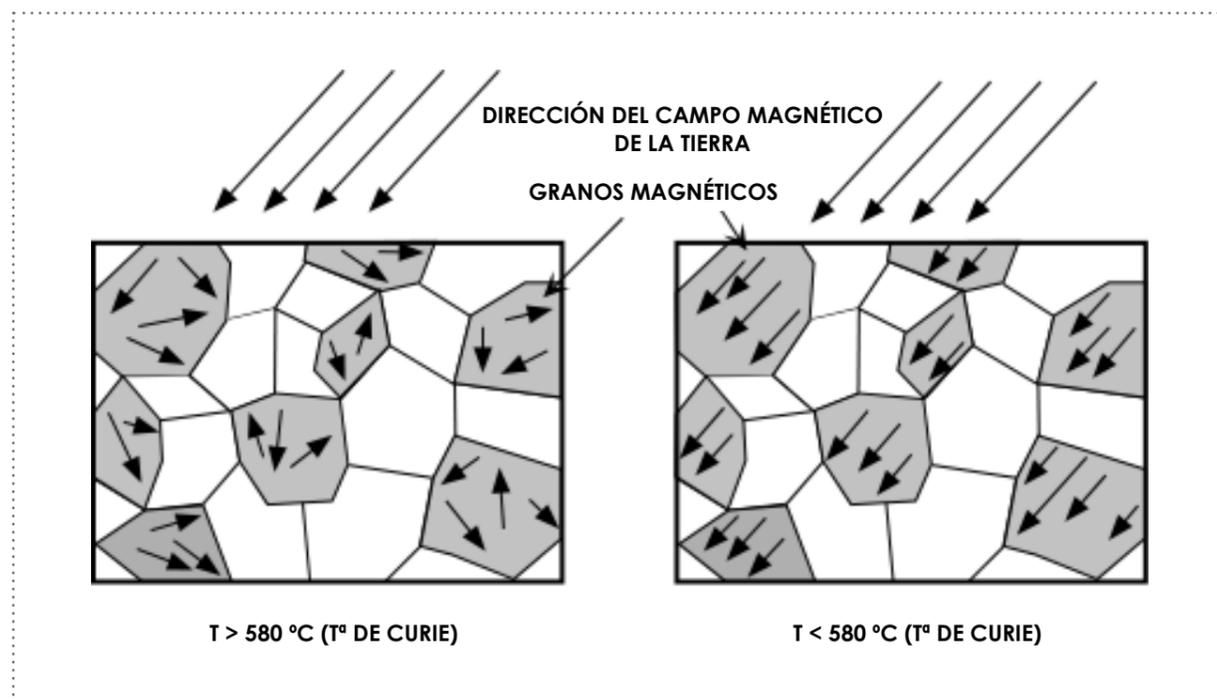
La Magnetoestratigrafía es una herramienta que se utiliza para datar y correlacionar con precisión sucesiones de estratos. Se basa en el registro de las sucesivas inversiones del campo magnético terrestre. La constatación de este fenómeno fue clave para establecer la expansión de los fondos oceánicos,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

El Paleomagnetismo y el viejo geólogo



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:

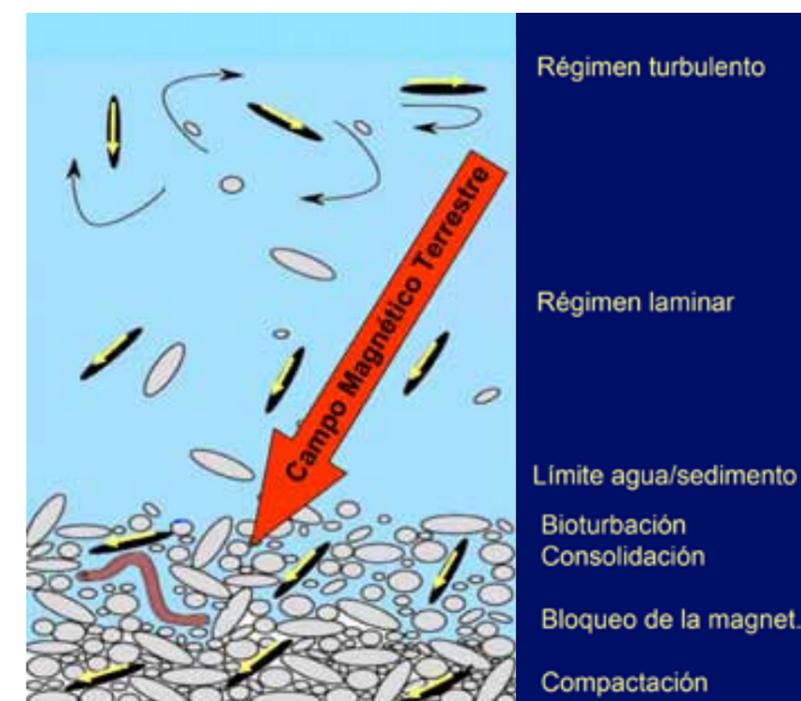
- En las rocas ígneas, los minerales magnéticos que se forman durante el enfriamiento del magma (magnetita y titanomagnetita mayoritariamente) se orientan según el campo magnético existente cuando la temperatura desciende por debajo del *punto de Curie*, propio de cada mineral, y fijan esta orientación 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



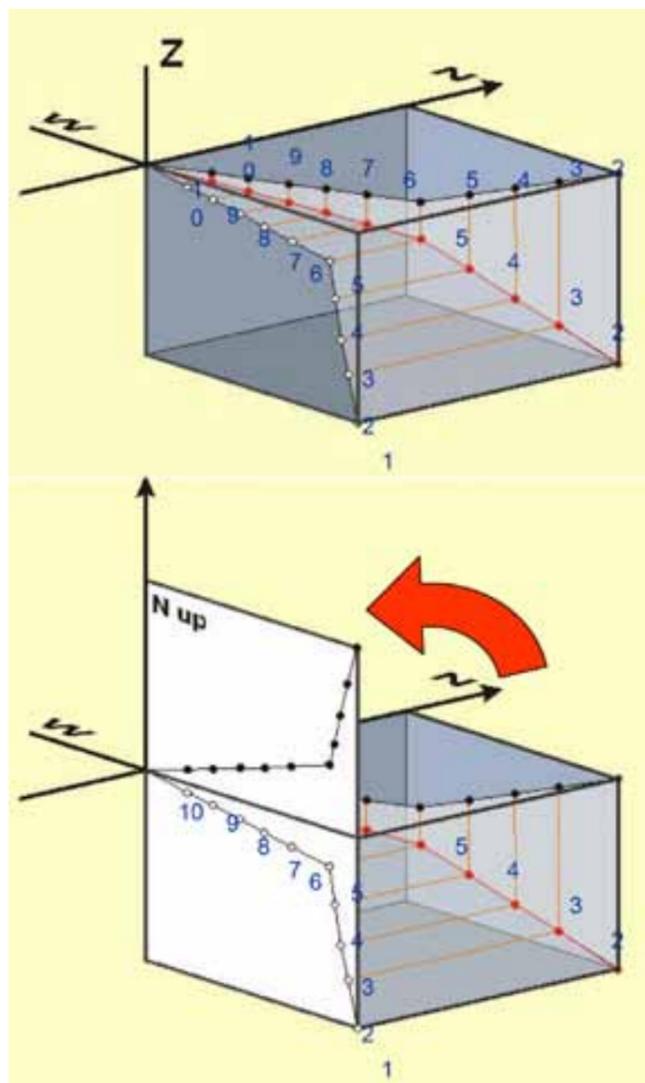
Fragmento de una magnetita.

www.tiendaminales.com

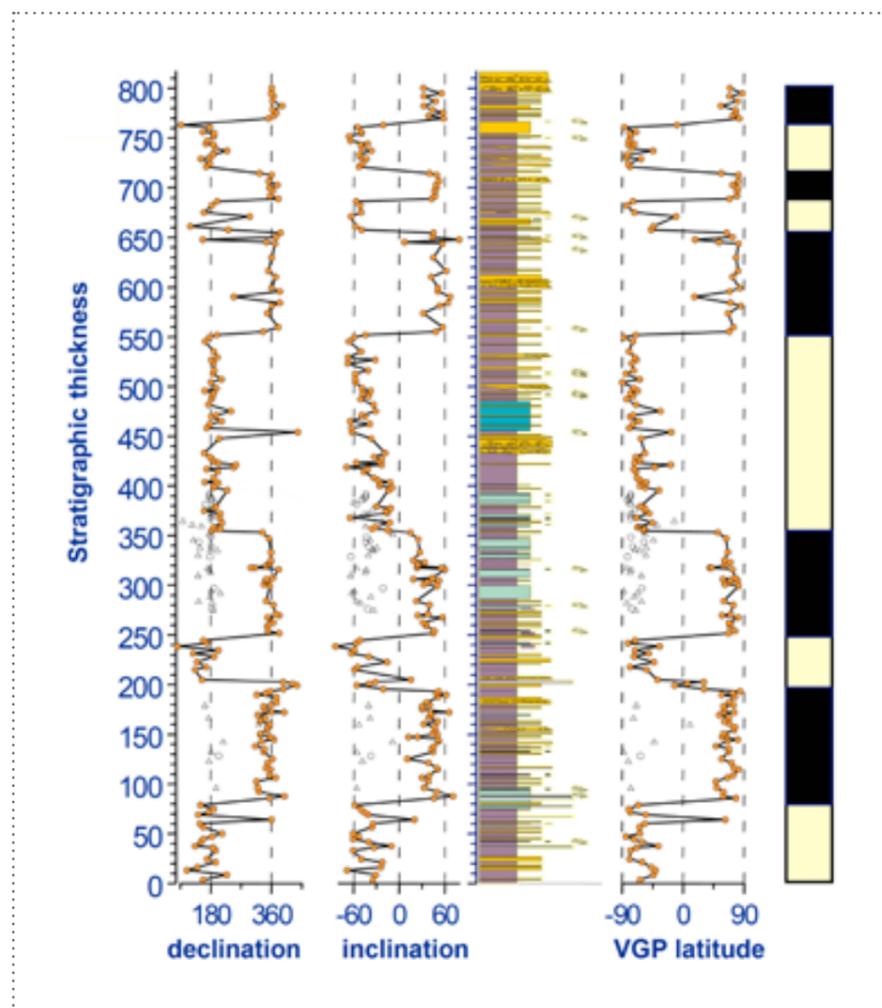
“En las rocas ígneas, los minerales magnéticos (magnetita y titanomagnetita mayoritariamente) se forman durante el enfriamiento del magma”.

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

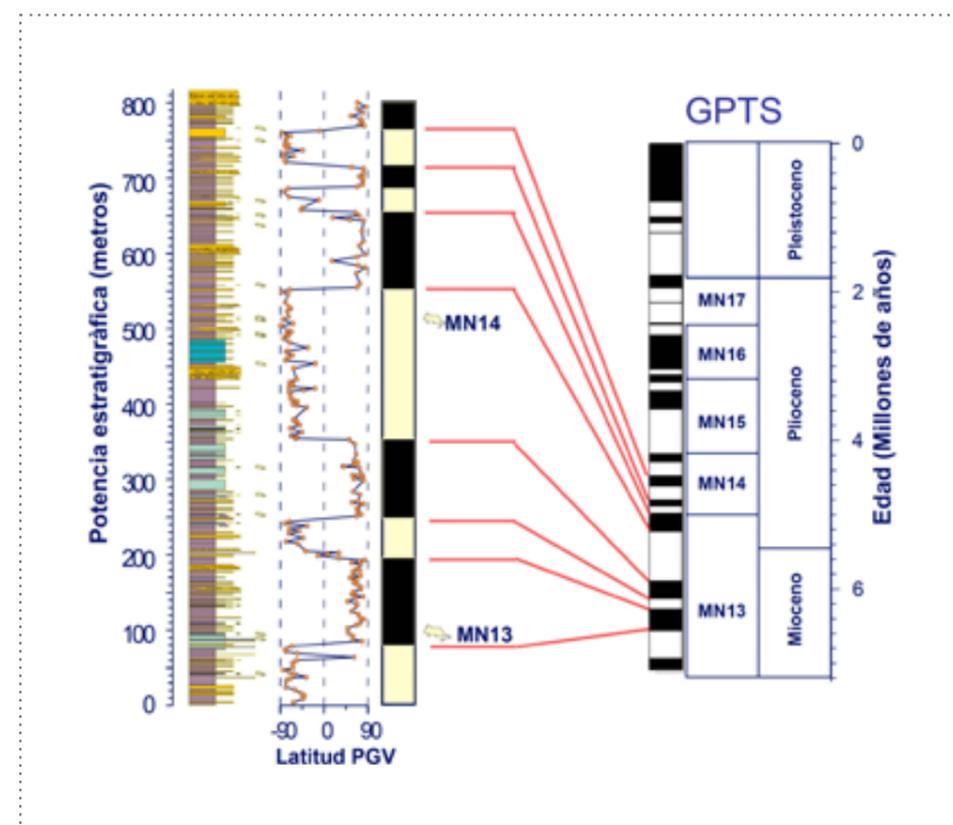
(por ejemplo de foraminíferos planctónicos en el caso de sedimentos marinos, de micromamíferos en sedimentos continentales). Ya solo queda encajar las magnetozonas locales con el patrón de inversiones de la GPTS de ese intervalo de tiempo.

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.

