

¿Qué aporta el magnetismo en estudios paleoclimáticos y medioambientales?

Paleoclimatology and environmental sciences; what can we learn from environmental magnetism?

JUAN CRUZ LARRASOÑA^{1,2} Y TANIA MOCHALES³

¹ Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Zaragoza, C/Manuel Lasala 44, 9B, Zaragoza 50006, España.
E-mail: jc.larra@igme.es

² Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera, ICTJA-CSIC, C/Lluís Solé i Sabarís, s/n, Barcelona 08028, España

³ Instituto Geológico y Minero de España C/La Calera 1, 28760 Tres Cantos - Madrid, España.
E-mail: taniamochales@gmail.com

Resumen El magnetismo ambiental es una disciplina de las ciencias de la Tierra que se ocupa del estudio de los procesos ambientales que condicionan la presencia de minerales magnéticos en distintos medios naturales y sedimentarios. En los últimos 25 años, el magnetismo ambiental se ha ido incorporado en estudios paleoclimáticos, ya que permite identificar cambios climáticos en el registro sedimentario y establecer modelos de edad basados en la identificación de cambios ambientales cuyo patrón y duración es correlacionable con cambios climáticos de duración conocida. Por otra parte, y debido a la frecuente asociación de distintos metales pesados con varios minerales magnéticos, el magnetismo ambiental permite llevar a cabo estudios de contaminación actual. En este trabajo se exponen brevemente los fundamentos básicos del magnetismo ambiental, se presentan dos ejemplos que ilustran la utilidad del magnetismo ambiental en estudios paleoclimáticos, y se propone una actividad práctica que ilustra el potencial del magnetismo ambiental en estudios de contaminación. Los dos ejemplos que ilustran las aplicaciones paleoclimáticas del magnetismo ambiental se centran en cambios climáticos de distinta duración y origen registrados en sedimentos del Mediterráneo oriental y de la península Ibérica. En ambos casos, la correlación de los cambios climáticos inferidos a partir de propiedades magnéticas con curvas patrón que indican el tipo de forzamiento climático permiten establecer modelos de edad de gran resolución que mejoran significativamente dataciones previas basadas en otros métodos. La actividad práctica se centra en la cartografía magnética de un área determinada, por medio de uno de los parámetros comúnmente utilizados en geomagnetismo: la susceptibilidad magnética. Por medio de este parámetro podremos delimitar las áreas potencialmente contaminadas y realizar sencillos mapas de contorno, a mano alzada y digitalmente.

Palabras clave: Contaminación, geocronología, magnetismo ambiental, minerales magnéticos, paleoclimatología.

Abstract *Environmental magnetism is a discipline of Earth Sciences that aims at studying the environmental processes that drive the presence of different magnetic minerals in natural environments. Over the last 25 years, environmental magnetism has gained increased recognition as a tool in paleoclimatic studies because it enables, in the first place, the identification of climatic changes via the influence they have in the type, concentration and grain size of magnetic minerals, and, secondly, the development of age models based on the correlation between environmental changes and target climate-forcing curves. Due to the frequent association of heavy metals with several magnetic minerals, environmental magnetic techniques can also be applied to studies of human-induced pollution. In this paper we present the fundamentals of environmental magnetism, a couple of examples that illustrate its utility in paleoclimatic studies, and also a practical exercise showing the application of magnetic properties in pollution studies. The first example, focused on climatic changes recorded in marine sediments from Eastern Mediterranean Sea, shows how diagenetic processes can overcome the depositional signal encoded in some magnetic minerals (e.g., magnetite in this case) while leaving other minerals (e.g., hematite) unaffected, so that it enables interpretation of their paleoclimatic significance. The second example, focused on abrupt climatic changes recorded in alluvial sediments from northern Iberia, illustrates the potential of environmental magnetic properties to detect climatic changes in sediments whose aspect appears to bear no paleoclimatic information. In both examples, the correlation of climatic variations encoded in magnetic properties with climate-forcing target curves allows us to develop age models with an improved resolution and accuracy compared to those provided by previous methods. The practical case focuses on the mapping of magnetic susceptibility, a parameter frequently used in geomagnetism. Using this property we will be able to mark off polluted areas working with contour maps, both by hand and using available computer techniques.*

Keywords: *Environmental magnetism, geochronology, magnetic minerals, paleoclimatology, pollution.*

INTRODUCCIÓN

De entre los temas de investigación más activos en el campo de las ciencias de la Tierra destacan los estudios sobre la variabilidad climática en el pasado y la influencia humana en el medio natural (ver Mas-Pla y Brusi, 2009). En lo que respecta a los cambios climáticos del pasado, la paleoclimatología, se sustenta en dos pilares fundamentales: (1) la identificación de cambios ambientales a partir del efecto que éstos tienen en las condiciones físico-químicas del medio sedimentario en el que se registran, y (2) la necesidad de obtener un conocimiento, lo más preciso y fiable que sea posible, del momento en el que dichos cambios han sucedido. La combinación de ambas fuentes de información permite establecer el origen de las variaciones ambientales y establecer su relación con la variabilidad climática. En cuanto al impacto humano en el medio natural, uno de los retos es el de encontrar indicadores eficientes que permitan valorar el origen y cuantificar el grado de afección de distintos contaminantes, entre los que destacan los metales pesados generados por la actividad industrial.

Denominamos magnetismo ambiental a la disciplina científica que se ocupa del estudio de los procesos ambientales que condicionan la presencia de minerales magnéticos en distintos ambientes de la superficie terrestre, incluidos los medios sedimentarios (para una revisión reciente sobre fundamentos, técnicas y aplicaciones ver Liu *et al.*, 2012). Esta disciplina se desarrolla en los años 80, como una rama del paleomagnetismo, con el objetivo principal de aportar información sobre la estabilidad (a escala de tiempo geológico) de la magnetización con la que los minerales magnéticos registran el campo magnético terrestre. Aunque los primeros trabajos en la disciplina datan de los años 40, con el estudio de sedimentos lacustres en Suecia, no es hasta la década de los 80 cuando el magnetismo ambiental se describe formalmente y se consolida como disciplina (Thompson *et al.*, 1980). A partir de este momento, y debido a la nueva perspectiva que ofrecen los minerales magnéticos sobre las condiciones ambientales, el magnetismo ambiental ha experimentado un auge importante hasta el punto de contribuir, de manera significativa, en estudios paleoclimáticos y medioambientales. En primer lugar, el magnetismo ambiental permite identificar cambios climáticos en el registro sedimentario a partir del efecto que éstos tienen en el tipo, concentración y tamaño de grano de los minerales magnéticos, que son extremadamente sensibles a pequeños cambios en las condiciones físico-químicas que prevalecen durante la producción, el transporte y la acumulación de los sedimentos que los contienen. La identificación de cambios ambientales cuyo patrón y duración es comparable (e.g., correlacionable) con cambios climáticos de duración conocida permite, asimismo, establecer modelos de edad de gran resolución y precisión. Por otra parte, la frecuente asociación de distintos metales con el hierro en varios minerales magnéticos convierte a las propiedades magnéticas en una técnica muy rápida y efectiva a la hora de estudiar procesos de contaminación actuales.

En este trabajo se describen los fundamentos básicos de las aplicaciones del magnetismo ambien-

tal en paleoclimatología y estudios medioambientales a partir de: a) dos ejemplos que involucran cambios climáticos de distinto origen, duración, e impacto en medios sedimentarios marinos y continentales, y b) una actividad práctica que ilustra el uso de las propiedades magnéticas como un indicador de contaminación medioambiental.

¿CUÁL ES EL ORIGEN DE LOS MINERALES MAGNÉTICOS QUE ENCONTRAMOS EN LA NATURALEZA?

Existen diversos tipos de minerales magnéticos que se caracterizan por presentar no sólo una composición y propiedades magnéticas distintas, sino por darse en ambientes de características muy diversas. El mineral magnético más importante es, sin duda, la magnetita (Fe_3O_4). Este mineral se da en todo tipo de rocas volcánicas, metamórficas y sedimentarias, de manera que es un mineral ubicuo en sedimentos que se han formado por la erosión de otras rocas, ya sea por acción del agua, del hielo o del viento. También se puede formar en sedimentos durante la diagénesis, es decir, durante los procesos de compactación, cementación, y litificación que convierten a los sedimentos en rocas sedimentarias. La magnetita puede formarse también mediante procesos edáficos en suelos, e incluso puede ser producida por bacterias (denominadas magnetotácticas) tanto en suelos como en medios sedimentarios acuáticos. Por último, cabe destacar que la magnetita es el mineral magnético que se forma de manera más habitual como resultado de la acción humana, en actividades tales como la combustión de carbón y derivados del petróleo, procesos industriales en hornos de cemento y fundiciones de hierro y acero, y el tráfico rodado (abrasión en frenos, ruedas y motores). Otro óxido de hierro importante en estudios de magnetismo ambiental es la maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Aunque tiene una composición química diferente a la de la magnetita, su estructura es la misma y tiene unas propiedades magnéticas similares. La maghemita es, básicamente, una forma oxidada de magnetita, de manera que es un mineral magnético habitual en medios sedimentarios continentales. También se puede formar en procesos industriales, aunque en menor medida que la magnetita. Otro mineral importante en estudios de magnetismo ambiental es la hematita, cuya composición es idéntica a la de la maghemita aunque posee una estructura cristalina diferente (por lo que se denota como $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Junto con la magnetita, la hematita es el óxido de hierro más importante en medios sedimentarios continentales, tanto como componente detrítico como formado por procesos diagenéticos y edáficos. También se forma en algunos sedimentos marinos depositados en condiciones oxidantes y como resultado de algunos procesos industriales. En medios sedimentarios oxidantes es muy habitual también la goetita (FeOOH), un oxi-hidróxido de hierro.

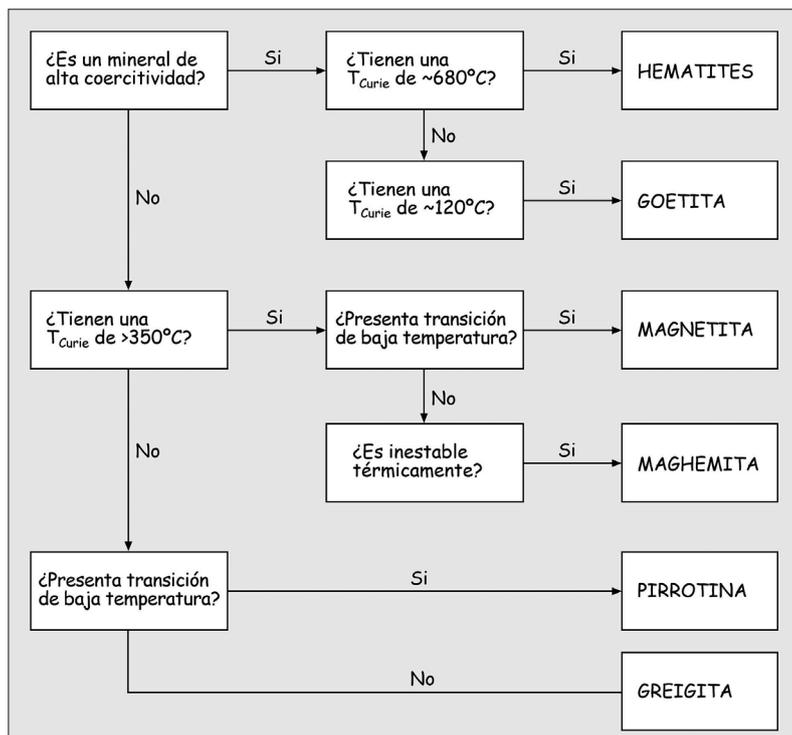
Por último, cabe destacar algunos sulfuros de hierro magnéticos, tales como la greigita (Fe_3S_4) y la pirrotina (Fe_7S_8), que se forman en medios acuosos bajo condiciones reductoras. La greigita es especialmente interesante en estudios paleoclimatológicos, ya que se puede acumular como resultado de la acción de bacte-

rias magnetotácticas o se puede formar durante la diagénesis más temprana, dando lugar a una señal que se puede considerar como deposicional. La pirrotina, por el contrario, se forma en condiciones diagenéticas más tardías, por lo que su presencia resulta muy difícil de interpretar en términos paleoclimáticos.

¿QUÉ MEDIDAS HAY QUE HACER EN EL LABORATORIO?

Las técnicas de laboratorio en magnetismo ambiental persiguen, principalmente, la identificación de los distintos minerales magnéticos que puedan aparecer en una muestra. Para ello, se sigue una secuencia de experimentos que, basándonos en distintas propiedades y a modo de un “quién es quién” magnético, permiten determinar qué mineral (o minerales) está presente en un medio determinado (Fig. 1). Estos experimentos pueden ser relativamente lentos o implicar la destrucción de la muestra, por lo que se suelen aplicar a muestras representativas de los distintos tipos de sedimento que estamos estudiando. Previamente, dichas muestras se someten a otros experimentos, rápidos y no destructivos, que están encaminados a determinar variaciones en la concentración y tamaño de grano de los distintos minerales magnéticos que podríamos encontrarlos en los materiales estudiados (Villalaín, 2016, en este volumen). La combinación de ambos tipos de datos con información auxiliar, ya sea geoquímica o biológica, permiten entender el origen y el significado de las variaciones registradas por los distintos minerales magnéticos. A partir de aquí, la rapidez de las técnicas magnéticas no destructivas permite producir series temporales con un significado paleoclimático ya establecido y con la resolución y duración necesarias como para permitir el estudio de la variabilidad climática a distintas escalas temporales.

Fig. 1. Esquema simplificado del “quién es quién” magnético empleado en la identificación de los minerales magnéticos presentes en una muestra.



APLICACIONES GEOCRONOLÓGICAS Y PALEOCLIMATOLÓGICAS DEL MAGNETISMO AMBIENTAL

¿Se pueden identificar y datar cambios climáticos de origen astronómico?

El primer ejemplo que se presenta es el de los cambios climáticos registrados por una secuencia de sedimentos marinos acumulados en el Mediterráneo oriental durante el final del Neógeno y el Cuaternario (Larrasoña *et al.*, 2003) (Fig. 2). Dicha secuencia tiene unos 9 m de espesor, ha sido recuperada en un sondeo del fondo marino, y se caracteriza por la presencia de sedimentos arcillosos cuyo color oscila entre grisáceo, amarillento y pardo-rojizo (Fig. 3). Entre estos sedimentos se intercalan capas de color oscuro, muy ricas en materia orgánica y con espesores de entre 4 y 20 cm, que se denominan sapropeles. Estos sapropeles aparecen en grupos

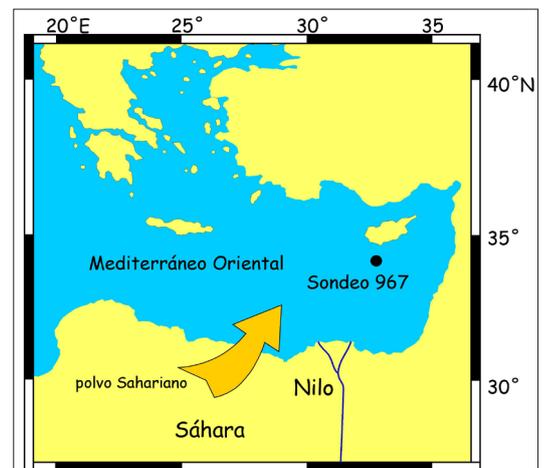


Fig. 2. Localización del Sondeo 967 en el Mediterráneo oriental (se señala también la dirección predominante de entrada de polvo Sahariano y el principal curso fluvial - el Nilo - en la zona) y detalle del muestreo de dicho sondeo.

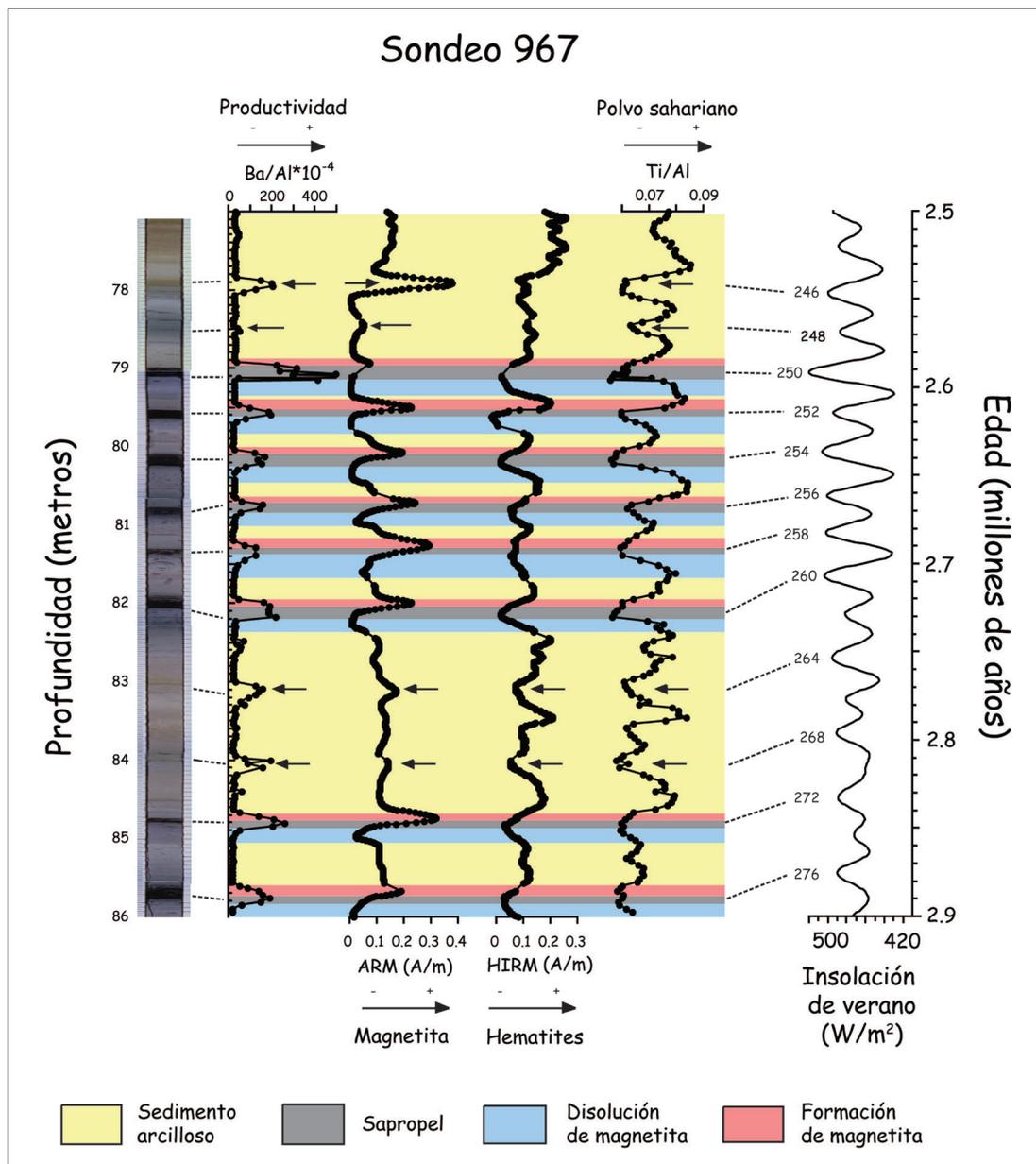


Fig. 3. Variaciones relativas de la concentración de magnetita y hematites (usando la ARM la HIRM como indicadores, respectivamente; ver Villalaín, 2016, en este volumen) en sedimentos marinos del Mediterráneo oriental. Estos datos se representan junto a las variaciones en la relación entre bario y aluminio (Ba/Al) y titanio y aluminio (Ti/Al) establecida para los mismos sedimentos. Obsérvese la excelente similitud entre las variaciones en la abundancia de hematites y Ti/Al , tanto entre sí como con la curva de insolación de verano calculada para la zona de estudio. Las franjas grises indican la posición de los denominados sapropeles, mientras que las franjas azules y rojas indican la posición de intervalos afectados por la disolución y neoformación de magnetita, respectivamente. Las flechas marcan la posición donde las propiedades geoquímicas y magnéticas indican características típicas de los sapropeles, que han sido totalmente oxidados durante la diagénesis (basado en Larrasoña et al., 2003). Se recomienda consultar la versión digital.

de 4 ó 5 y separados por intervalos más o menos regulares de 60-100 cm, lo que le da al sedimento un cierto aspecto cíclico. Datos bioestratigráficos (basados en microfósiles) y magnetoestratigráficos (Garcés y Beamud, 2016, en este volumen) previos indican que estos sedimentos se acumularon entre hace unos 2.5 y 3 millones de años. La ciclicidad sedimentaria se manifiesta en varias propiedades geoquímicas que nos aportan información sobre su propio significado paleoclimático.

Así, los sedimentos arcillosos entre los que se intercalan los sapropeles se caracterizan por valores muy bajos en el cociente entre el contenido en bario y aluminio (Ba/Al) y por máximos relativos en el cociente entre el contenido en titanio y aluminio (Ti/Al). Valores muy bajos en Ba/Al indican condiciones de muy baja productividad oceánica (e.g., biomasa producida en el océano), similar a la que predomina hoy en día. Por otra parte, valores altos de Ti/Al denotan un máximo de aportes eólicos en relación a los aportes fluviales, ya que el Ti va asociado a minerales pesados transportados por el viento

procedente del desierto del Sáhara mientras que el Al está relacionado con minerales de la arcilla de origen tanto eólico (Sahariano) como fluvial (principalmente el Nilo). Estas condiciones son típicas del clima árido que predomina en la actualidad en el entorno del Mediterráneo oriental. En contraposición, los sapropeles están caracterizados por máximos en Ba/Al y mínimos en Ti/Al , que indican condiciones más húmedas, distintas a las actuales en las que hay menos aportes eólicos y más aportes fluviales que estimulan una mayor productividad oceánica.

La concentración de los distintos minerales magnéticos guarda una clara relación con las condiciones climáticas que predominaron durante el depósito de estos sedimentos. Así, los sapropeles muestran abundancias de magnetita que cambian gradualmente entre los mínimos (situados por debajo de los propios sapropeles) y los máximos situados por encima. Para entender el significado de estos cambios hay que tener en cuenta las condiciones ambientales del fondo marino durante la formación de los sapropeles. Durante los periodos húmedos,

cuando se forman los sapropeles, la materia orgánica acumulada pasa a ser degradada por microorganismos. Esto hace que el oxígeno disuelto se consuma rápidamente, y supone un cambio en las condiciones químicas del sapropel y de los sedimentos situados inmediatamente por debajo, que pasan de óxicas a anóxicas (Fig. 4). Dichas condiciones implican la disolución en condiciones reductoras de la magnetita, lo que explica sus mínimos en los sapropeles y en los sedimentos situados inmediatamente por debajo. Cuando las condiciones climáticas cambian y se hacen más áridas, ya no se acumula materia orgánica, y en lugar de un sapropel se acumulan sedimentos arcillosos. El oxígeno disuelto en el agua marina, ahora abundante, penetra hacia abajo y oxida la parte superior del sapropel infrayacente, lo que supone la neo-formación (mediada por bacterias) de magnetita y explica los picos de abundancia de magnetita que observamos inmediatamente por encima de cada sapropel (Fig. 4). La disolución y formación de magnetita en relación con la degradación y oxidación de la materia orgánica durante la diagénesis enmascara por completo cualquier información original que la magnetita podría aportar sobre las condiciones climáticas que prevalecieron durante la acumulación de los sedimentos.

Además de la magnetita, el mineral magnético más importante en los sedimentos estudiados es la hematita. A diferencia de la magnetita, la hematita no presenta máximos y mínimos de concentración en las posiciones inmediatamente por encima o por debajo de los sapropeles. En realidad, los

máximos y mínimos de hematitas siguen fielmente los máximos y mínimos observados en el contenido en polvo Sahariano, de manera que observamos mínimos contenidos de hematitas en los sapropeles y máximos en los sedimentos intermedios. Esto indica que la hematita es un mineral magnético de origen eólico cuya concentración no parece estar afectada por los procesos diagénéticos que sí afectan a la magnetita.

En la figura 3 se muestra, junto a las propiedades geoquímicas y magnéticas, una curva con las variaciones en la insolación de verano calculada para el norte de África. Dicha curva viene dada por la interacción entre varios parámetros orbitales, tales como la excentricidad de la órbita de la Tierra en torno al sol, la inclinación del eje de rotación terrestre, y su precesión (los denominados ciclos de Milankovitch, ver Martín-Chivelet *et al.*, 2015). Dichos parámetros presentan variaciones cíclicas de diferente duración, cuya combinación determina la cantidad de radiación que llega a un punto concreto de la Tierra durante un periodo o estación concretos. La similitud entre las curvas que indican variaciones en la abundancia de polvo Sahariano con la curva de la insolación de verano permite establecer una relación entre la alternancia de condiciones secas y húmedas con periodos en los que la insolación alcanza valores mínimos y máximos. Cuando los valores de insolación de verano son máximos, las precipitaciones del monzón africano se expanden sobre el Sáhara, dando lugar a la expansión de la vegetación, al descenso de los aportes eólicos, al aumento de

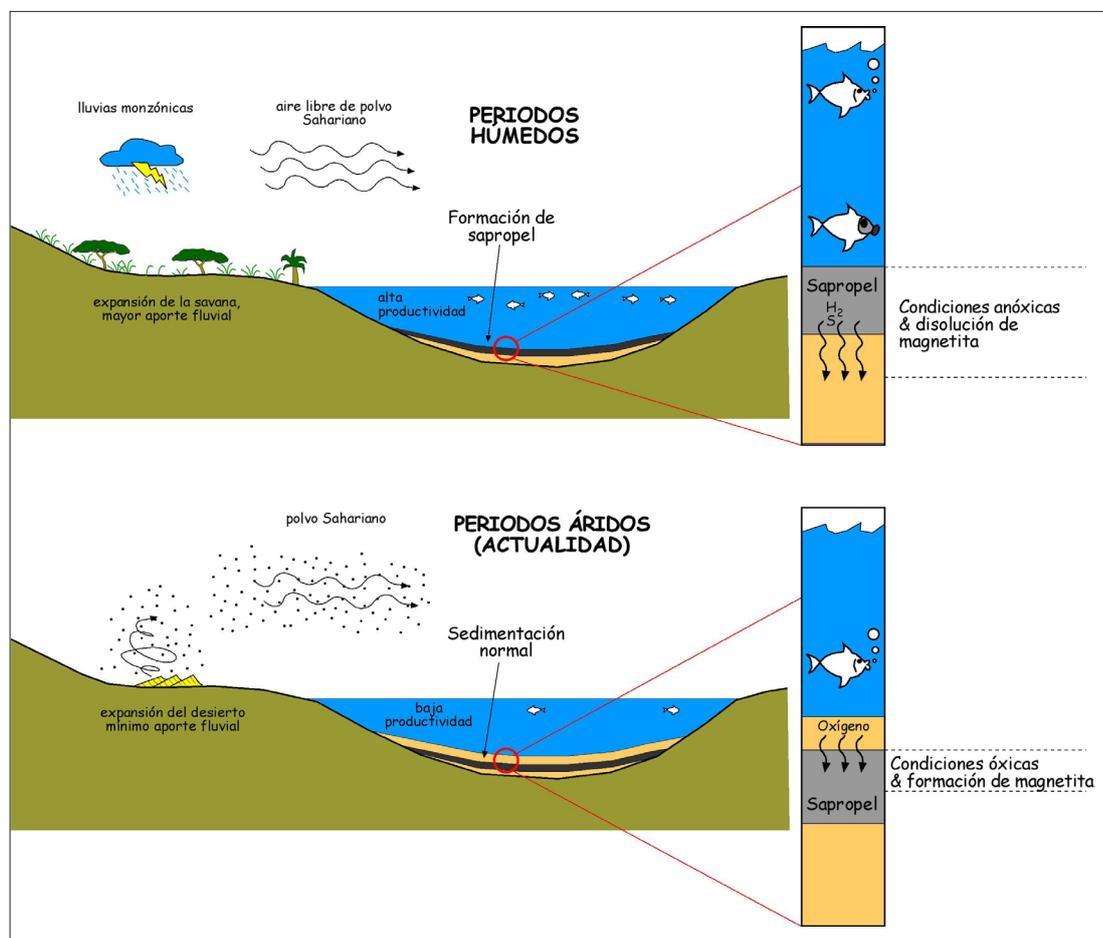


Fig. 4. Esquema que ilustra las condiciones climáticas imperantes durante la formación de sapropeles, en periodos húmedos, y de los sedimentos intercalados entre ellos (condiciones áridas similares a las actuales).

aportes fluviales y al aumento en la productividad oceánica; esto se traduce en la acumulación de materia orgánica y la formación de sapropeles (Fig. 4). Cuando la insolación de verano es mínima el monzón africano pierde intensidad, lo que se traduce en un aumento de aportes eólicos debido a la vuelta de las condiciones desérticas, una disminución de los aportes fluviales y de la productividad oceánica, y la acumulación de sedimentos arcillosos pobres en materia orgánica (Fig. 4). Como las variaciones orbitales tienen una duración conocida, la correlación pico a pico de la abundancia de hematitas y el cociente Ti/Al con la curva de insolación permite establecer un modelo de edad de mayor resolución que el inicial. Es interesante destacar que, en algunos tramos de la secuencia, se observan mínimos de polvo Sahariano que van asociados a los picos y/o mínimos de magnetita que caracterizan a los sapropeles. Esto permite identificar, en consonancia con los máximos de productividad, sapropeles que han sido completamente oxidados durante la diagénesis y que habrían pasado inadvertidos en un estudio visual de la serie sedimentaria.

¿Podemos identificar y datar cambios climáticos abruptos?

El siguiente ejemplo que se expone es el de los cambios climáticos abruptos registrados en una secuencia de sedimentos continentales de la cuenca de Añavieja, en la Cordillera Ibérica soriana (Fig. 5). Dicha secuencia presenta un espesor de 25 m y ha sido recuperada en un sondeo (AÑ2) que ha sido estudiado por Oliva-Urcia *et al.* (2016). La secuencia se caracteriza por dos unidades: 1) una superior, cons-

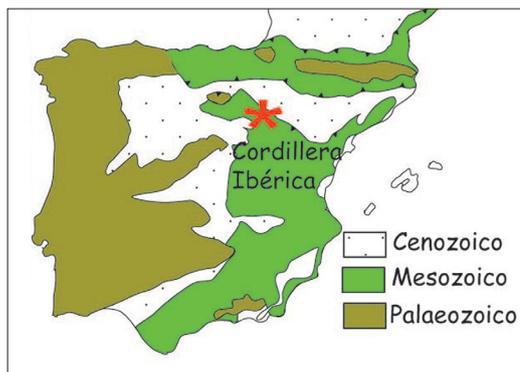


Fig. 5. Localización del sondeo AÑ2 y la cuenca de Añavieja.

tituida por los tres metros superiores del registro, caracterizada por arcillas laminadas de color gris-beige acumuladas en un medio lacustre, y 2) una inferior, formada principalmente por 22 m de arcillas de color rojo y aspecto masivo, acumuladas en un medio aluvial y que incluyen varias intercalaciones de limos, arenas y, ocasionalmente, de gravas (Fig. 6). La datación de 6 niveles mediante el método del carbono-14 arroja edades correspondientes al Holoceno (e.g., últimos 11500 años) para los 3 m superiores acumulados en un medio lacustre, y edades correspondientes al Pleistoceno superior (entre 11500 y 19000 años aproximadamente) para la secuencia aluvial. El hecho de que las dataciones se hayan realizado sobre muestra total debido a la ausencia de restos de carbón, unido al error de las dataciones y al hecho de que algunas aparezcan invertidas (p. ej. muestras más profundas dan edades más modernas), obliga a tomar estos datos como una primera aproximación.

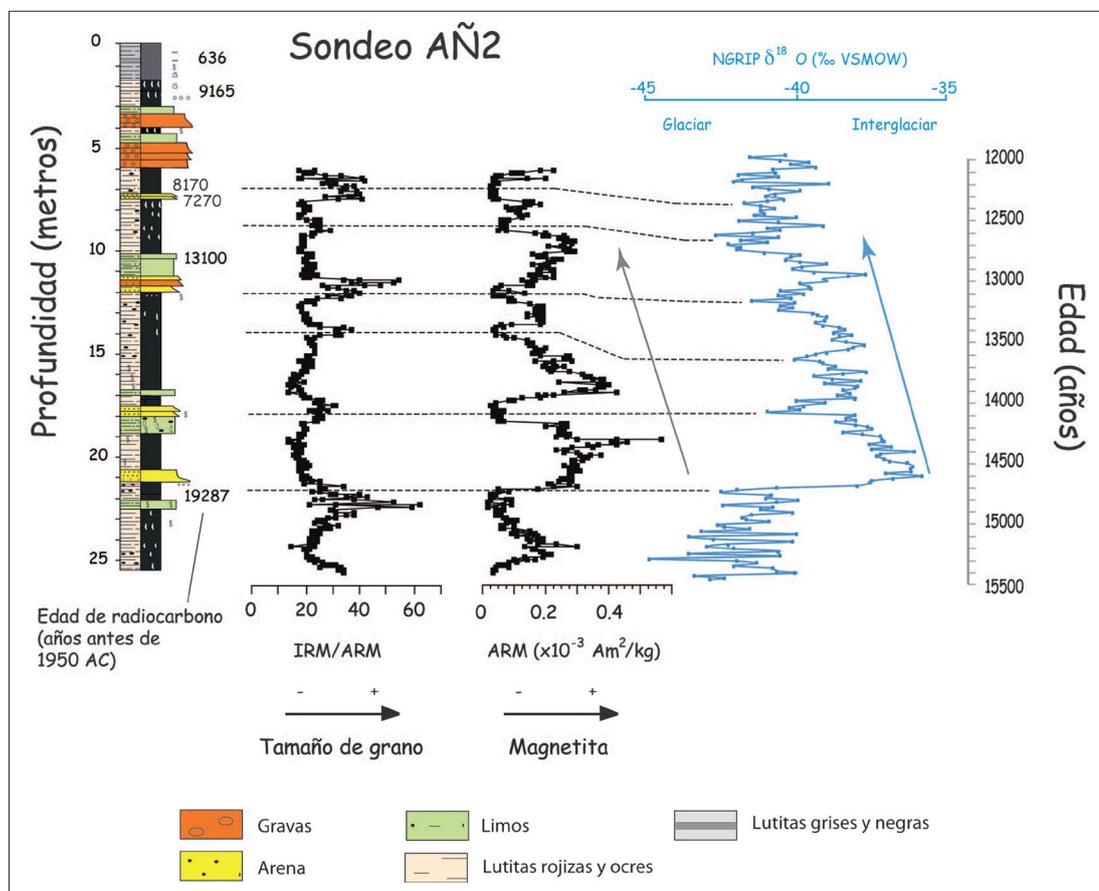
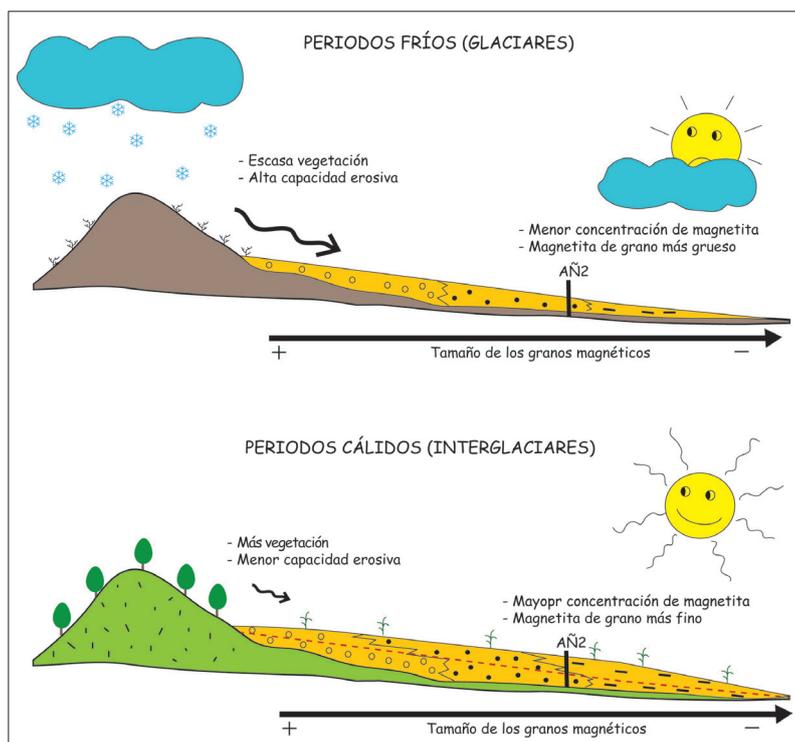


Fig. 6. Variaciones relativas en el tamaño de grano y la concentración de magnetita (usando el cociente IRM/ARM y la ARM, respectivamente) en sedimentos continentales de la cuenca de Añavieja recuperados en el sondeo AÑ2. Obsérvese la excelente similitud entre la ARM y la curva isotópica del oxígeno en el sondeo de hielo NGRIP (basado en Oliva-Urcia *et al.*, 2016).

Las propiedades magnéticas de la secuencia aluvial, caracterizada por la presencia de magnetita, son especialmente relevantes ya que permiten ver una variabilidad dentro de los tramos masivos de arcillas y limos que no se manifiestan en cambios litológicos relevantes. Así, vemos que las propiedades magnéticas marcan la existencia de tramos de 2 a 4 m caracterizados por un aumento brusco en la concentración de magnetita y por una disminución posterior algo más gradual. Entre los tramos correspondientes a los metros 22 y 12, asimismo, parece que la concentración de magnetita en sucesivos picos se va haciendo gradualmente menor. En lo que respecta al tamaño de la magnetita, observamos tamaños de grano más gruesos no sólo en los tramos de limos y arenas, sino también en algunos intervalos dentro de los sedimentos arcillosos de aspecto masivo. Teniendo en cuenta los datos cronológicos previos, el parecido entre las variaciones en la abundancia de magnetita en el sondeo AÑ2 y la curva isotópica obtenida en el sondeo NGRIP (Groenlandia), que marca la alternancia de periodos glaciares e interglaciares de edad conocida en el ámbito del Atlántico norte, es notable. Dicha similitud permite, en base a una correlación pico a pico entre la curva de abundancia de magnetita y la curva NGRIP, obtener un modelo de edad para la secuencia aluvial de Añavieja más preciso que el basado en las dataciones de carbono-14. Esta correlación pone de manifiesto la rapidez con la que los medios sedimentarios aluviales responden a los cambios climáticos abruptos de origen glaciar/interglaciar ocurridos en el hemisferio norte. La correlación permite, asimismo, entender el mecanismo que regula la repuesta de los medios aluviales a dichos cambios abruptos (Fig. 7). Así, los periodos glaciares se corresponden con momentos fríos de menos cobertera vegetal, que favorece la energía de los procesos erosivos y la llegada de componentes detríticos más groseros, incluida una mayor cantidad de magnetita de grano grueso.

Fig. 7. Esquema que ilustra el papel del clima en la cantidad y tamaño de grano de la magnetita en los sedimentos de la cuenca de Añavieja.



Durante los periodos interglaciares, un clima más benigno favorece la expansión de la vegetación y la disminución de la energía de los procesos erosivos, que se traduce en la llegada de magnetita de grano más fino.

APLICACIONES AMBIENTALES DE LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS. ESTUDIO DE CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE PROPIEDADES MAGNÉTICAS

Objetivos de la actividad

Mediante el desarrollo de esta actividad, el alumnado será capaz de evaluar zonas potencialmente contaminadas por metales pesados por medio de la realización de mapas de contorno. Los mapas de contorno se construirán a partir de datos proporcionados en esta actividad, aunque el profesor/a puede aplicarlo a cualquier otro sistema geográfico cuyo valor Z sea variable (p.ej. altitud). La localización de los posibles focos de contaminación será el resultado de la propia valoración del alumnado. El objetivo final es asimilar los conceptos de susceptibilidad magnética y mapa de contornos.

Fundamentos

La *susceptibilidad magnética* es la medida cuantitativa de la capacidad que tiene un material de ser magnetizado en presencia de un campo magnético externo (Soto, 2016, en este volumen). La susceptibilidad volumétrica (κ) está definida en el Sistema Internacional por la siguiente relación:

$$M = \kappa \cdot H$$

Donde M es la magnetización del material (medido en Amperios/metro, A/m),

H es la intensidad del campo magnético aplicado (también medido en A/m),

y donde se desprende que κ es una magnitud adimensional.

Podemos realizar una sencilla clasificación de la materia en función de su susceptibilidad magnética:

Diamagnéticas: son aquellas sustancias que presentan una magnetización débil y opuesta al campo magnético aplicado. La susceptibilidad diamagnética es pequeña y negativa: $\kappa < 0$.

Paramagnéticas: son aquellas sustancias que presentan una magnetización débil y paralela al campo magnético aplicado. La susceptibilidad paramagnética, aunque débil, es positiva: $\kappa > 0$.

Ferromagnéticas: son las sustancias que presentan una magnetización intensa y paralela al campo magnético aplicado. La susceptibilidad ferromagnética es muy alta y positiva: $\kappa \gg 0$. A diferencia de las sustancias diamagnéticas y paramagnéticas, las ferromagnéticas retienen un magnetismo remanente (denominado *remanencia*) cuando se retira el campo externo aplicado.

La determinación de la susceptibilidad magnética como método de cartografía magnética se está revelando en las últimas décadas como un método

rápido, eficaz y no destructivo para evaluar zonas con elevadas concentraciones en metales pesados (p.ej. Liu *et al.*, 2016). Elevados contenidos en As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, etc., suelen estar relacionados con elevados valores de susceptibilidad magnética, mostrando patrones espaciales que ayudan a la industria descontaminante a afinar su trabajo de un modo cuantitativo.

Propuesta 1: cómo construir un mapa de contornos

1. Duración aproximada de la sesión: 1 h. El profesor/a introducirá el concepto de susceptibilidad magnética y pondrá ejemplos de qué tipos de sustancias serían diamagnéticas (e.g. agua, sal, yeso, grafito, bronce, azufre...), paramagnéticas (e.g. arcilla, granito, magnesio, aluminio, titanio, platino...) y ferromagnéticas (magnetita, hematites, hierro, níquel...).

2. En la práctica se observarán los valores de susceptibilidad magnética medidos en muestras de suelo de la ciudad de Kaifeng (China), donde se ha realizado un reciente estudio (Lui *et al.*, 2016), así como su variación espacial (Fig. 8). Se evalúa con los alumnos qué zonas podrían contener mayor y menor concentración de materiales ferromagnéticos, y qué relación guardan dichos minerales con la distribución de metales pesados.

3. Los mapas de contorno son el resultado de unir líneas imaginarias que conectan puntos con

el mismo valor. El mismo desarrollo puede aplicarse en el caso de querer explicar las curvas de nivel en un mapa. Se propone que los estudiantes creen líneas de contorno de los siguientes rangos de valores de susceptibilidad magnética, y a cada tramo le atribuyan un color:

- » 30-70·10⁻⁶ S.I. - amarillo
- » 70-85·10⁻⁶ S.I. - verde
- » 85-90·10⁻⁶ S.I. - azul
- » 90-105·10⁻⁶ S.I. - violeta
- » 105-140·10⁻⁶ S.I. - rosa
- » 140-235·10⁻⁶ S.I. - fucsia
- » 235-475·10⁻⁶ S.I. - granate

Comenzando por las líneas de menor valor, puede observarse el mapa con las líneas de contorno de 70·10⁻⁶ S.I. y 85·10⁻⁶ S.I. (con posibles variaciones respecto al ejemplo, Fig. 9).

Se continuaría por las líneas de 90·10⁻⁶ S.I. y 105·10⁻⁶ S.I. (Fig. 10):

El mapa de contornos resultante presentaría un aspecto similar a la figura 11:

4. Se planteará a los alumnos/as que determinen las zonas de mayor susceptibilidad magnética. Se debatirá dónde podrían encontrarse los metales contaminantes de la ciudad de Kaifeng. En el debate también sería interesante cuestionar posibles direcciones de migración de los metales pesados desde la zona industrial y posibles causas de esta migración.

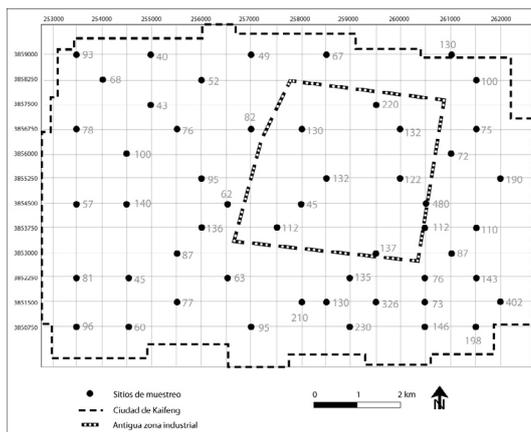


Fig. 8. Distribución de muestras de suelo en la ciudad de Kaifeng y valores de susceptibilidad ($\cdot 10^{-6}$ S.I.).

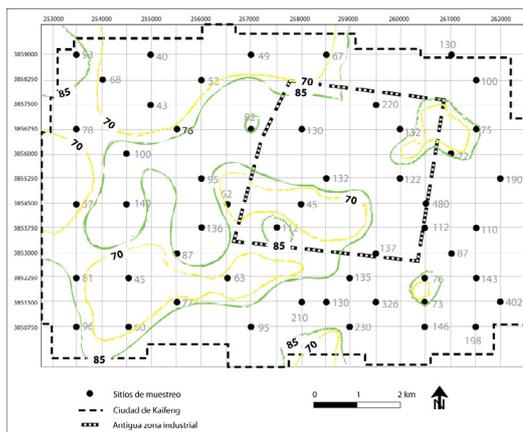


Fig. 9. Líneas de contorno de los valores de susceptibilidad 70-10⁻⁶ S.I. y 85·10⁻⁶ S.I.

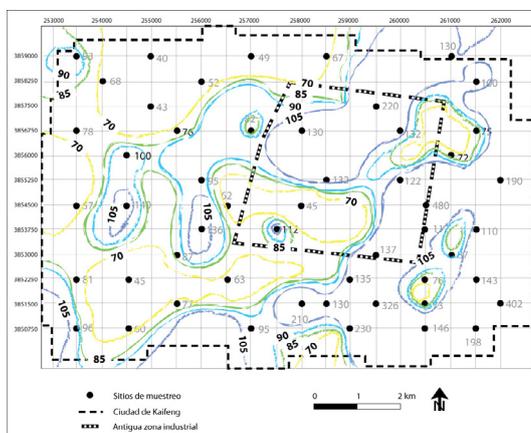


Fig. 8. Distribución de muestras de suelo en la ciudad de Kaifeng y valores de susceptibilidad ($\cdot 10^{-6}$ S.I.).

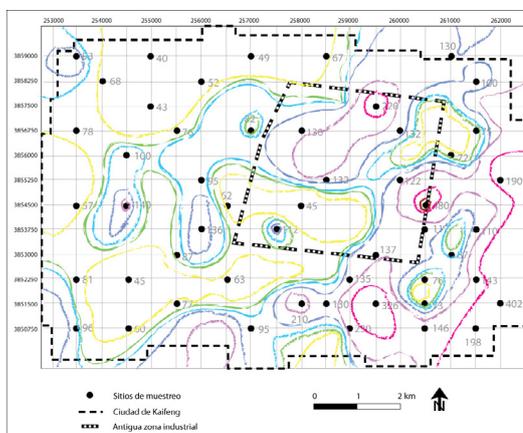
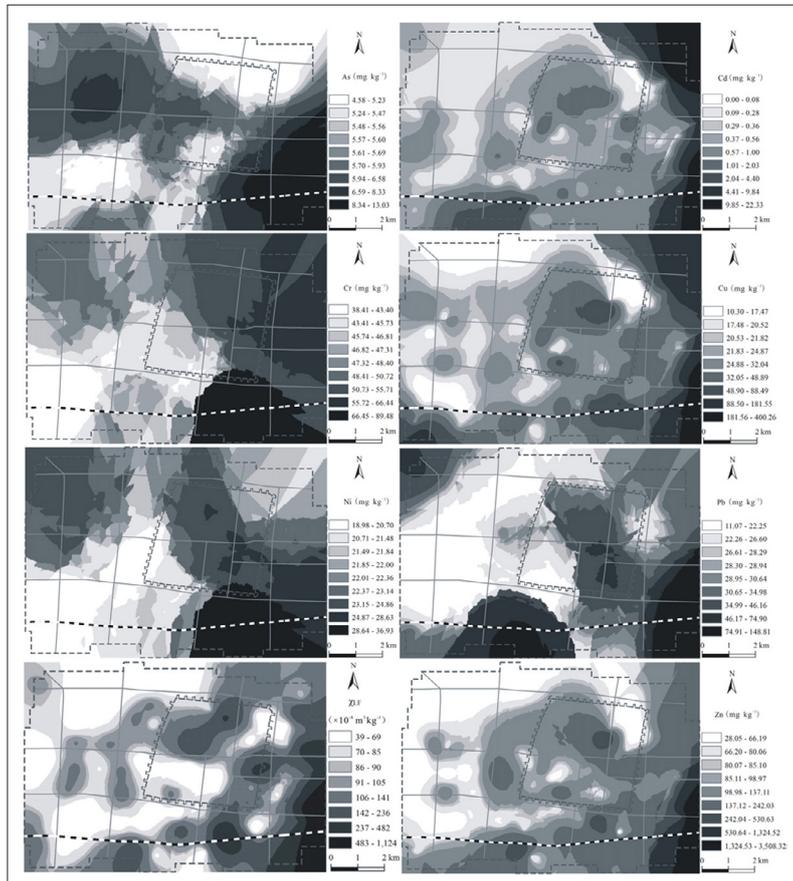


Fig. 11. Líneas de contorno de los valores de susceptibilidad 70, 85, 90, 105, 140, 235 y 475 ($\cdot 10^{-6}$ S.I.).

5. Cuestiones a debate:

- En la figura 12 se muestran las concentraciones de arsénico, cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo, zinc y valores de susceptibilidad magnética (κ) para la ciudad de Kaifeng. Se propone debatir sobre qué zonas presentan mayor concentración de metales pesados y evaluar la eficacia de la susceptibilidad magnética a la hora de determinar la presencia de metales pesados. ¿Qué elementos se encontrarían mejor caracterizados a partir del estudio de las propiedades magnéticas?

Fig. 12. Distribución espacial de los valores medidos de susceptibilidad magnética (κ) y concentraciones de metales pesados en los suelos urbanos de Kaifeng (Liu et al., 2016).



- El índice de carga de contaminación PLI (Pollution Load Index) es usado para determinar el grado de contaminación en suelos por metales pesados. Comparar el mapa PLI con el mapa de contornos realizado (Fig. 13).

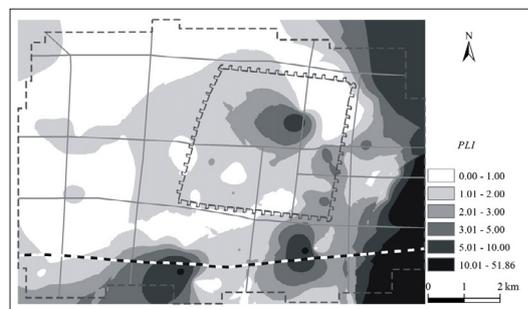


Fig. 13. Distribución espacial de PLI de metales pesados en Kaifeng (Liu et al., 2016).

Propuesta 2: aplicación al aula

1. Duración aproximada de la sesión: 1 h. Esta sesión debería realizarse en un aula de informática, o con ordenador portátil por cada dos o tres alum-

nos. En la práctica se aprenderá a construir el listado de valores necesarios para realizar un mapa de contornos con una aplicación informática. El software utilizado podría ser p.ej. **Contour Map Software 3DField** de Vladimir Galouchko, libre y disponible en la red: <http://www.3dfmmaps.com/>.

2. Si no se ha realizado la práctica del mapa de contornos a mano alzada, se deben explicar los conceptos de susceptibilidad magnética y los ejemplos de sustancias dia-/para-/ferromagnéticas. También deben observar los valores de susceptibilidad en la ciudad de Kaifeng (China) descritos en los puntos 1 y 2 de la propuesta 1 (Fig. 8).

3. En este caso, poner especial interés en las coordenadas geográficas donde se localiza cada medida de susceptibilidad magnética.

4. A continuación, se rellenarán los valores que faltan de la tabla I. Esta tabla es la necesaria para llevar a cabo la práctica con el software indicado. Se usará como fuente de información la figura 8, de donde se extraerán los valores de susceptibilidad y las coordenadas necesarias para completar la tabla.

5. Una vez que los alumnos/as hayan asimilado cómo se construye la tabla, el profesor/a proporcionará la tabla en Excel o los alumnos/as teclearán los valores en Excel.

6. Se seleccionan las tres columnas de valores en Excel (sin el encabezado) > copia > **pegado especial** en una hoja de texto (p.e. Word, Text edit...). El listado de datos tendrá un aspecto similar a la figura 14.

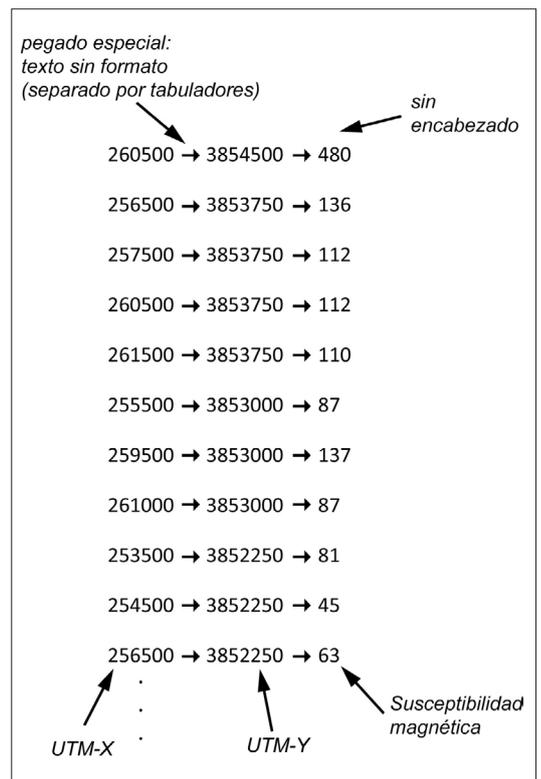


Fig. 14. Aspecto tras realizar copia y pegado especial (texto sin formato) en Word.

7. En Word se ejecuta **Guardar como > Texto sin formato (*.txt)**. Nombrar el fichero (p.ej. <Kaifeng.txt>) y guardar adecuadamente en una carpeta fácilmente localizable.

| COORDENADAS UTM- X | COORDENADAS UTM- Y | SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (x 10 ⁻⁶ S.I.) |
|--------------------|--------------------|---|
| 253500 | 3859000 | 93 |
| 255000 | 3859000 | |
| 257000 | 3859000 | 49 |
| 258500 | 3859000 | 67 |
| 261000 | 3859000 | |
| 254000 | 3858250 | 68 |
| 256000 | 3858250 | 52 |
| 261500 | 3858250 | 100 |
| 255000 | 3857500 | 43 |
| 259500 | 3857500 | 220 |
| 253500 | | 78 |
| 255500 | 3856750 | 76 |
| 257000 | 3856750 | 82 |
| 258000 | 3856750 | 130 |
| 259500 | 3856750 | 132 |
| | 3856750 | 75 |
| 254500 | 3856000 | 100 |
| 261000 | | 72 |
| 256000 | 3855250 | 95 |
| 258500 | 3855250 | |
| 256000 | 3855250 | 122 |
| 262000 | 3855250 | 190 |
| | 3854500 | 57 |
| 254500 | 3854500 | 140 |
| 256500 | 3854500 | 62 |
| 258000 | | 45 |
| 260500 | 3854500 | 480 |
| 256500 | 3853750 | 136 |
| 257500 | 3853750 | 112 |
| 260500 | 3853750 | 112 |
| 261500 | 3853750 | 110 |
| 255500 | 3853000 | 87 |
| 259500 | 3853000 | |
| 261000 | 3853000 | 87 |
| 253500 | 3852250 | 81 |
| 254500 | 3852250 | |
| 256500 | 3852250 | 63 |
| 259000 | 3852250 | 135 |
| 260500 | | 76 |
| 261500 | 3852250 | 143 |
| 255500 | 3851500 | 77 |
| | 3851500 | 210 |
| 258500 | 3851500 | 130 |
| 259500 | 3851500 | |
| 260500 | 3851500 | 73 |
| 262000 | 3851500 | 402 |
| | 3850750 | 96 |
| 254500 | 3850750 | 60 |
| 257000 | 3850750 | 95 |
| 259000 | 3850750 | 230 |
| 260500 | 3850750 | |
| 261500 | 3850750 | 198 |

Tabla I. Listado de valores de susceptibilidad magnética interpretados a partir del artículo (Liu et al., 2016), localizados en la ciudad de Kaifeng (Fig. 8). Revisar la figura 8 para rellenar los valores que faltan.

8. Descargar el software **Contour Map Software 3DField** para la visualización de mapas de contorno en:

<http://3dfmaps.com/maps/download.htm>

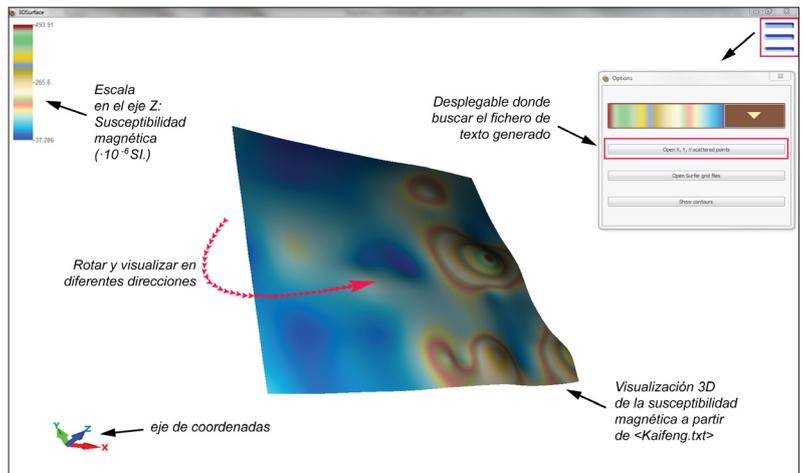
Descargar <3DSurface.zip> (resaltado en la figura 15)



Fig. 15. Descarga de 3DSurface.zip

9. Descomprimir > ejecutar 3DSurface.exe. El programa se pone en funcionamiento muy sencillamente.

10. En 3D Surface: **Open X,Y, Z scattered points** > buscar el fichero generado (<Kaifeng.txt>) y abrir. Se visualiza una superficie 3D, donde X e Y representan las coordenadas UTM y Z el valor de susceptibilidad magnética. Se pueden cambiar los colores de visualización y rotar la superficie (Fig. 16).



11. En caso de no haber realizado la propuesta didáctica 1, evaluar comparativamente el mapa de contorno de susceptibilidad magnética con los mapas de concentración de metales pesados de la propuesta 1 (puntos 4 y 5).

Fig. 16. Visualización en digital de las líneas de contorno de Kaifeng por medio del programa 3D Surface.

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo se presentan los fundamentos básicos del magnetismo ambiental, disciplina que contribuye significativamente en estudios paleoclimáticos al permitir identificar y datar cambios climáticos en el registro sedimentario. Se presentan dos ejemplos que ilustran la utilidad del magnetismo ambiental en estudios paleoclimáticos. El primer ejemplo, centrado en sedimentos marinos del Me-

diterráneo oriental, ilustra cómo los procesos diagenéticos pueden llegar a enmascarar por completo la señal deposicional de algunos minerales magnéticos (en este caso la magnetita), mientras que otros minerales magnéticos (e.g., hematites) permanecen inalterados y aportan información sobre la dinámica del monzón africano. El segundo ejemplo, centrado en sedimentos aluviales del norte de la península Ibérica, muestra como las propiedades magnéticas permiten identificar periodos glaciares e interglaciares en sedimentos que, a priori, tienen un aspecto masivo y no parecen registrar tales cambios de manera evidente. En ambos casos, la correlación de los cambios climáticos inferidos a partir de propiedades magnéticas con curvas patrón que indican el tipo de forzamiento climático (variaciones orbitales en el primer caso y cambios climáticos abruptos en el segundo), permiten establecer modelos de edad de gran resolución que mejoran significativamente dataciones previas basadas en otros métodos. Como actividad práctica se propone construir a mano alzada y digitalmente un mapa de contornos con los valores de susceptibilidad de un caso real, en la ciudad de Kaifeng (China). Por medio de los mapas obtenidos, se propone comparar y debatir la utilidad de la medida de propiedades magnéticas para la evaluación de zonas contaminadas por metales pesados.

BIBLIOGRAFÍA

- Garcés, M. y Beamud, E. (2016). La Magnetoestratigrafía y la Escala del Tiempo Geológico basada en las inversiones del campo magnético terrestre. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24.3, 282-293.
- Larrasoña, J.C., Roberts, A.P., Rohling, E.J., Winkhofer, M. y Wehausen, R. (2003). Three million years of monsoon variability over the northern Sahara. *Climate Dynamics*, 21, 689-698.
- Liu, Q., Roberts, A.P., Larrasoña, J.C., Banerjee, S.K., Guyodo, Y., Tauxe, L. y Oldfield, F. (2012). Environmental magnetism: principles and applications. *Reviews of Geophysics*, 50, RG4002.
- Liu, D., Ma, J., Sun, Y. y Li, Y. (2016). Spatial distribution of soil magnetic susceptibility and correlation with heavy metal pollution in Kaifeng City, China. *Catena*, 139, 53-60.
- Martín-Chivelet, J., Palma, R.M., Domingo, L. y López-Gómez, J. (2015). Cicloestratigrafía, cambio climático y la escala de tiempo astronómico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23.3, 136-147.
- Mas-Pla, J. y Brusi, D. (2009). Geología y cambio climático. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17.2, 118-119.
- Oliva-Urcia, B., Muñoz, A., Larrasoña, J.C., Luzón, A., Pérez, A., González, A., Jiang, Z., Liu, Q. y Román-Berdiel, T. (2016). Response of alluvial systems to Late Pleistocene climate changes recorded by environmental magnetism in the Añavieja Basin (Iberian Range, NE Spain). *Geologica Acta*, 14.2, 139-154.
- Soto, R. (2016). ¿Qué nos indica la orientación preferente de minerales detectada a partir del estudio de la fábrica magnética?. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24.3, 325-334.
- Thompson, R., Bloemendal, J., Dearing, J.A., Oldfield, F., Rummery, T.A., Stober, J.A. y Turner, G.M. (1980). Environmental applications of magnetic measurements. *Science*, 207, 481-486.
- Villalaín, J.J. (2016). La historia del campo magnético terrestre registrada en las rocas. Fundamentos del Paleomagnetismo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24.3, 261-274. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 17 de junio y aceptado definitivamente para su publicación el 30 de julio de 2016.