

Descubriendo los secretos de la Tierra. Geomagnetismo: experimentos y demostraciones didácticas

Uncovering the secrets of the Earth. Geomagnetism: didactic experiments and demonstrations

LAIA RAMON – SALA¹, EDSON ROBERTO DA SOUZA^{1,2} Y DAVID BRUSI¹

¹Departament Ciències Ambientals/GEOCAMB. Facultat de Ciències. Universitat de Girona. E-mail: laia.ramon@udg.edu; laia.ramon.sala@gmail.com; david.brusi@udg.edu

²Ensino e História de Ciências da Terra – IG/UNICAMP. Campinas (Brasil) E-mail: fisedson@ig.com.br

Resumen El campo magnético es una propiedad física fundamental de nuestro planeta. Su enfoque en la enseñanza es fronterizo entre la física y la geología. Pese a su reconocida importancia, a menudo es abordado de forma muy superficial porque entraña conceptos abstractos y difíciles de comprender para los estudiantes a todos los niveles. Las evidencias y características del campo magnético terrestre, su origen, su declinación e intensidad, las propiedades de los minerales ferromagnéticos, la extensión de los fondos oceánicos y la magnetosfera son algunos de los aspectos fundamentales que deberían ser abordados cuando se desarrolla este tema en las clases de geociencias. En este trabajo se presentan seis prácticas de laboratorio que ilustran estas ideas. Para cada una de las actividades se describen los contenidos, objetivos, conocimientos previos, material necesario, fundamentos, desarrollo de la actividad y, finalmente, cuestiones para el debate. El principal objetivo es proporcionar a los profesores recursos didácticos para tratar de un modo práctico el geomagnetismo en el aula.

Palabras clave: Campo magnético, enseñanza y simulación, geomagnetismo.

Abstract *The magnetic field is a basic physical property of our planet., By approaching it we move in the borderland between Physics and Geology. In spite of its undoubted importance, geomagnetism is usually introduced in a superficial way because its abstract and difficult concepts are not easily understood by the students. The features and evidence of the Earth's magnetic field, its origin, its declination and intensity, the properties of the ferromagnetic minerals, the ocean-floor spreading and the magnetosphere are fundamental aspects to be considered when a teacher delves into this subject in a geoscience lesson. In this paper, we introduce six laboratory projects that illustrate these topics. For each activity, there is a description of contents, objectives, previous knowledge, main materials, theoretical basis, step by step explanation and finally points for discussion. The main purpose is to provide teachers with educational resources that help them develop geomagnetism in a practical way inside the classroom.*

Keywords: *Geomagnetism, magnetic field, teaching and simulation.*

INTRODUCCIÓN

El geomagnetismo en la enseñanza de las Ciencias de la Tierra

El magnetismo terrestre y las propiedades magnéticas de algunos minerales tienen una gran aplicación e interés en las investigaciones geológicas. Como de todos es sabido, ha sido utilizado clásicamente para orientarnos mediante el uso de instrumentos. El campo magnético (a diferencia de otros campos como el gravitatorio) puede quedar “grabado” en los materiales geológicos como una propiedad remanente. Esta característica, junto a la datación mediante técnicas

radiométricas, ha permitido descubrir la expansión de los fondos oceánicos y ratificar la teoría de la Tectónica de Placas. Por otra parte, la detección de anomalías magnéticas o desviaciones de los valores normales del campo magnético terrestre son la base de un método de prospección geofísica que se aplica fundamentalmente en la localización de cuerpos metálicos en el subsuelo y en la interpretación de algunas estructuras geológicas profundas. Desde un punto de vista ambiental, algunos animales utilizan el campo magnético para orientarse en sus desplazamientos (Fanjul de Moles y de Oyarzábal, 2007 y Diego-Rasilla, 2004), y la magnetosfera protege a la vida de los efectos nega-

tivos del viento solar que destruiría la capa de ozono si no existiera (Hwang *et al.*, 2012).

En la enseñanza de las Ciencias de la Tierra, el campo magnético de nuestro planeta y su influencia en múltiples procesos se identifican como una sub-idea clave en la alfabetización científica (Pedrinaci *et al.*, 2013). Aunque es evidente la importancia del tema, el geomagnetismo se enfrenta en el entorno educativo a numerosas dificultades para un tratamiento adecuado que facilite su aprendizaje. Su enfoque es claramente fronterizo entre la física y las ciencias de la naturaleza, lo que supone un factor limitante para la correcta comprensión del fenómeno entre los docentes y, por extensión, entre los estudiantes.

El geomagnetismo también debe salvar numerosos errores conceptuales de los alumnos, que entorpecen su estudio. Es habitual, por ejemplo, la confusión entre el campo gravitatorio y el campo magnético o entre los polos magnéticos y geográficos (Granda, 1988). También es común la idea de interpretar el campo magnético como el resultado de la existencia de un imán gigante en el centro del planeta -incorporada a numerosas ilustraciones de libros de texto- o el equívoco que sitúa el norte del dipolo magnético y el polo norte geográfico en el mismo hemisferio, cuando, en realidad, estrictamente desde un punto de vista físico, deberían interpretarse al revés (García-Montoya, 1999). Convencionalmente, se interpreta que el norte magnético y el sur magnético se sitúan en los mismos hemisferios que sus homólogos geográficos como se muestra en la Fig. 1.

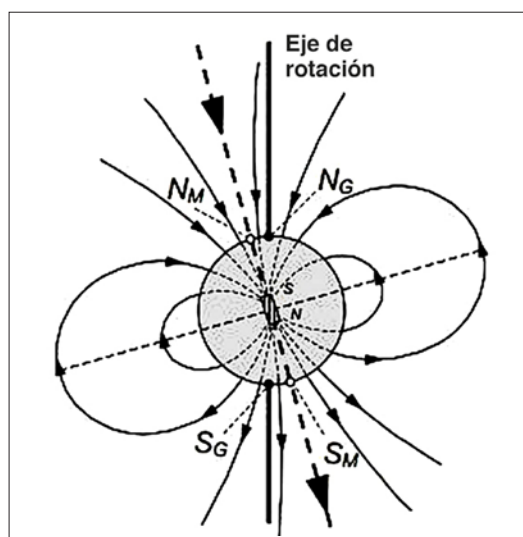
También presentan dificultades para el aprendizaje las cuestiones relativas a la relación de equivalencia entre una espira de corriente y un imán de acuerdo con el marco teórico de la física (Guisasola *et al.*, 2003). En este escenario es poco frecuente complementar el tratamiento teórico con actividades prácticas de laboratorio que conduzcan a un aprendizaje más significativo.

ACTIVIDADES PRÁCTICAS SOBRE GEOMAGNETISMO

Se pretende ofrecer una aproximación al geomagnetismo, simulando mediante maquetas, experimen-

Fig. 1: La línea gruesa vertical es el eje de rotación de la Tierra, con N_G y S_G como polos geográficos. La línea de trazos es la dirección de la barra imantada SN que produce un campo magnético equivalente al que hay en el exterior de la Tierra, con N_M y S_M como polos magnéticos. Nótese que los polos en la barra son opuestos a los anteriores.

(Fuente: http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/rdelgado/docencia/FISICA_ITI/PRACTICAS/Campo-Magn-Terr.pdf)



tos o mapas, algunos aspectos seleccionados. No planteamos las actividades didácticas como simples demostraciones, puesto que una de las claves del éxito de las prácticas y los modelos analógicos radica en que los alumnos dispongan del tiempo necesario para desarrollar la actividad, formularse preguntas y encontrar una solución plausible basándose en un modelo constructivista. También nos fijamos el objetivo de esclarecer algunas ideas que pueden generar malentendidos conceptuales. Las actividades sugeridas pretenden acercar a los participantes los conceptos más relevantes del geomagnetismo, abordadas en unidades didácticas de geología general de educación secundaria o universidad.

Cada una de las actividades incluye los contenidos que van a ser tratados, los objetivos que pretende lograr, los conocimientos previos requeridos antes de empezar, el material, los fundamentos científicos básicos, el desarrollo de la práctica y algunas cuestiones para el debate. Éstas últimas pretenden, por una parte, propiciar el diálogo entre los alumnos y reconocer en el modelo analógico una vía de experimentación para conseguir las respuestas. Aunque también pueden utilizarse como guion para una puesta en común final -moderada, si es preciso, por el profesor- para reflexionar sobre la práctica realizada, discutir los resultados y establecer algunas conclusiones.

Al margen de la actividad introductoria que, como es lógico, se propone realizar en primer lugar, el resto de prácticas pueden secuenciarse a criterio del docente. Con una participación activa por parte de los alumnos, el tiempo necesario para la realización de cada actividad es de unos 20-40 minutos, incluyendo la puesta en común final.

Actividad introductoria: el geomagnetismo

Contenidos: Demostración de la existencia del campo magnético terrestre.

Objetivos: Aflorar malentendidos conceptuales que puedan tener los participantes.

Conocimientos previos: Al ser una actividad introductoria no se precisan conocimientos previos.

Material: Pecera, agua, tapones de corcho, alfileres, imán y brújula (Fig. 2).

Fundamentos: El campo magnético puede representarse como una magnitud de carácter vectorial, donde para cada punto puede determinarse la intensidad, dirección y sentido. El campo magnético



Fig. 2: Materiales necesarios para la práctica.



Fig. 3: a. Cortando los corchos con un centímetro de espesor. b. Frotando los alfileres para magnetizarlos. c. El alfiler encima del corcho se orienta con el dipolo magnético, comprobado con la brújula.

terrestre puede interpretarse como equivalente al que produciría un dipolo magnético situado en el centro de la Tierra. Los polos geomagnéticos son los puntos en los que el eje del dipolo intersecta la superficie y forma un ángulo de unos 11° con el eje de rotación de la Tierra (Lanza y Meloni, 2006).

El sentido del vector en cualquier campo magnético es de norte a sur, pero en el terrestre las líneas parten del sur magnético y llegan al norte magnético (Fig. 1). No obstante, estrictamente, desde un punto de vista físico, su localización sería la inversa.

Desarrollo de la actividad: Con todos los participantes se establecerá un diálogo para poner en común los conocimientos y dudas existentes sobre el geomagnetismo. ¿Cómo se percibe la existencia de un campo magnético en la Tierra? ¿Todos los materiales se ven influidos por su efecto? ¿Qué origina el campo magnético? ¿El magnetismo es una propiedad exclusiva de la Tierra? ¿Por qué el campo magnético presenta un carácter bipolar?

A continuación, se planteará la realización de un experimento. Para ello, previamente, se habrá llenado de agua una pecera (se puede utilizar también cualquier recipiente con una superficie de lámina de agua suficiente). Se sitúa la pecera en un lugar visible para todos los asistentes. Después, con un cuchillo se corta una rodaja de corcho de un centímetro de espesor para obtener un disco que pueda flotar libremente sobre el agua. En una de las bases se realiza una muesca y, en ella, se coloca un alfiler que previamente se ha magnetizado frotándolo con un imán. Finalmente, se coloca suavemente el corcho con el alfiler sobre el agua de la pecera procurando que no toque el borde. Se observa que el corcho se moverá hasta apuntar en la dirección del campo magnético¹ (Fig. 3).

Cuestiones para el debate²:

- ¿Qué es una brújula?
- ¿Qué fuerza orienta los materiales magnéticos?
- ¿Por qué en el campo magnético de la Tierra domina un dipolo axial?
- ¿El campo magnético tiene que ver con la influencia del Sol? ¿De la gravedad? ¿De la fuerza de Coriolis?
- ¿Cómo y dónde se origina el campo magnético terrestre?

¹ Más información en: <http://www.experimentosdefisica.net/experimentos-de-magnetismo-brujula-casera/> o <http://ellaboratoriodelcole.blogspot.com.es/2011/01/el-magnetismo.html>

² El anexo recoge las cuestiones con una respuesta poco obvia o evidente.

- ¿Qué dirección y sentido tienen las líneas del campo magnético terrestre?

Origen del campo magnético de la Tierra

Contenidos: Simulación del campo magnético de la Tierra.

Objetivos: Analizar tres posibles modelos del campo magnético terrestre, compararlos con el comportamiento real y escoger el modelo más próximo a la realidad.

Conocimientos previos: La Tierra presenta un campo magnético cuyo origen está en la composición y dinámica de su núcleo externo. El geomagnetismo se puede detectar mediante una aguja imantada o brújula. Un campo magnético puede crearse por un material magnético, es decir, un imán; o bien, por una corriente de electrones. Una corriente eléctrica alterna genera un campo magnético con inversiones de polaridad.

Material: Tres esferas de poliestireno expandido³ huecas, tres cajas de cartón, tres brújulas, imán y un circuito de corriente eléctrica continua con un inversor (Fig. 4).

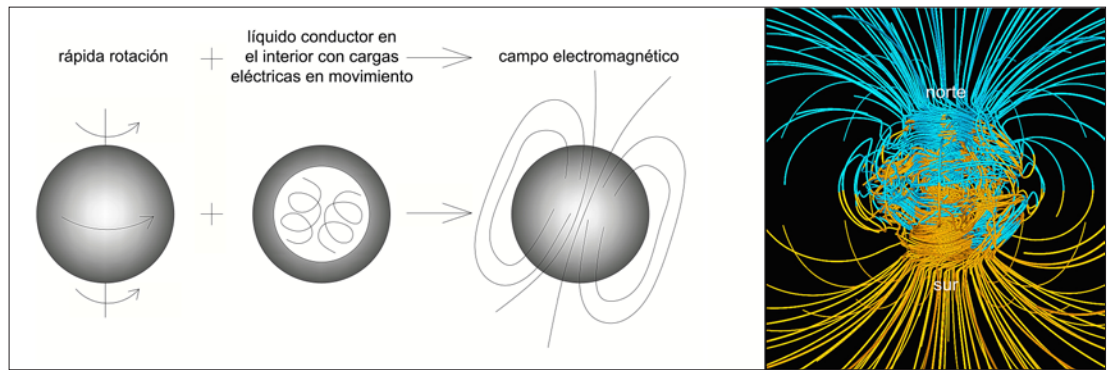
Fundamentos: Hace más de cuatro siglos el físico y médico inglés, William Gilbert, publicó la obra *De Magnete* que es el primer tratado científico sobre geofísica, desarrollando el conocimiento del geomagnetismo que se tenía en aquel momento (Dormy, 2006). En la actualidad, existen numerosos modelos teóricos que intentan explicar el origen y los efectos producidos por el campo magnético de la Tierra (Lewis, 2010). Sin embargo, el conocimiento sobre la dinámica interna del planeta es escaso para poder explicar, de forma inequívoca, su origen, su mantenimiento y las inversiones que se producen en nuestro planeta.



Fig. 4: Materiales necesarios para la práctica.

³ En España porexpan.

Fig. 5: Esquema de la teoría de la dinamo. (Fuente: <http://www.projetportal.org.br/noticias/1403-invsao-do-polo-magnetico-da-terra-veja-como-isso-pode-ocorrer.html>)



La hipótesis más aceptada es la que asume que en el núcleo externo se produce el proceso de dinamo autoinducida, donde la combinación de la convección causada por el intercambio de calor entre el manto-núcleo y la rotación de la Tierra producen un movimiento complejo en el fluido, necesario para generar el campo magnético. (Lanza y Meloni, 2006) La Fig. 5 muestra una representación de la formación del campo magnético terrestre según esta teoría.

Desarrollo de la actividad: Se prepara el material como se indica en la Fig. 4. Las cajas servirán de base a tres esferas de *poroxpan* huecas, que están suspendidas mediante soportes que simulan los tres modelos posibles de la Tierra. En el primero, la esfera y la caja están vacías; en el segundo la caja está vacía, pero dentro de la esfera se ha colocado un imán; y en el tercero la esfera contiene unas espiras formando una bobina que están conectadas a un circuito que se sitúa dentro de la caja con una

pila de petaca, una resistencia y un inversor, como se muestra en la Fig. 6. Al empezar la actividad las esferas están cerradas con velcro. Los participantes pasarán un *magnaprobe*⁴ por las tres esferas y observarán su comportamiento. En la primera esfera el *magnaprobe* no se moverá, lo cual indica que en la esfera no existe un campo magnético. En la segunda esfera, el *magnaprobe* se orientará indicando el norte y el sur magnéticos, pero no presentará inversiones. En la tercera esfera el *magnaprobe* se orientará de la misma forma que en la esfera anterior, pero esta vez, cuando se pulse el inversor, se invertirán los polos magnéticos⁵.

Con estas observaciones los participantes tendrán que elegir la maqueta más parecida a la realidad. Una vez hecha la elección se abrirán las tres esferas y se observará qué origina el campo magnético.

Cuestiones para el debate⁶:

- ¿Por qué se orienta una brújula en la Tierra?
- ¿Cuál es la orientación y sentido del campo magnético en los distintos puntos de las esferas?
- ¿Por qué en el campo magnético de la Tierra domina un dipolo axial?
- ¿Cómo se genera el campo magnético?
- ¿Cuál es la polaridad de la Tierra? ¿Ahora es normal o inversa?
- ¿Existen las inversiones magnéticas? ¿Tenemos alguna evidencia de ello?

La declinación e intensidad del campo magnético de la Tierra

Contenidos: Observación de la declinación e intensidad magnética en distintos puntos de la superficie de la Tierra.

Objetivos: Ilustrar cómo en distintas latitudes de la Tierra hay diferentes declinaciones magnéticas.

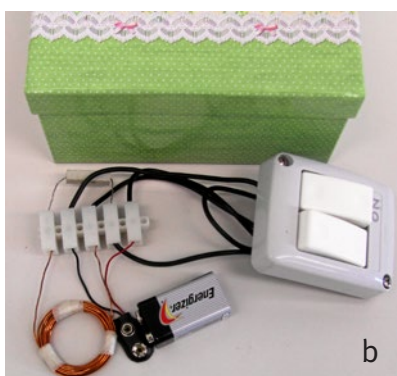
Conocimientos previos: El norte geográfico y magnético no coinciden en el mismo punto. La diferencia en grados entre ambos es la declinación. La intensidad del campo magnético es la fuerza en

⁴ Un *magnaprobe* es un pequeño imán de barra montado en un cardán de manera que es libre de girar en tres dimensiones. Pueden encontrarse en el mercado diversos modelos.

⁵ Más información en: www.earthlearningidea.com – *Magnetic Earth; Modelling the magnetic field of the Earth.*

⁶ El anexo recoge las cuestiones con una respuesta poco obvia o evidente

Fig. 6: a. Entrañas de las maquetas, la primera vacía, segunda con un imán y tercera con una bobina conectada con la caja (se colocará horizontal antes de cerrarla). b. Circuito colocado en la caja (menos la bobina). c. Pasando el *magnaprobe* por una de las maquetas para observar si hay un campo magnético.



la superficie de la Tierra, y varía, aproximadamente, entre 25000 y 65000 nanoteslas⁷.

Material: Mapas topográficos o geológicos de diferentes partes del mundo que contengan la declinación, fotocopia del mapamundi (Fig. 7).

Fundamentos: Las agujas imantadas no señalan exactamente el norte geográfico porque el polo magnético no se localiza en el eje de rotación de la Tierra. Para cada punto de la superficie terrestre, la diferencia angular entre la dirección del norte geográfico y la dirección que indica la brújula es la declinación. Por lo tanto, en cada lugar de la Tierra la declinación magnética es distinta.

Desde 1840 existe registro, más o menos continuo, de la posición exacta del norte magnético (De la Torre, 2009), aunque desde el siglo XVI en el Observatorio de Greenwich existen medidas puntuales mucho más antiguas. En la Fig. 8 se observa como se ha trasladado unos 970 km al norte en los últimos 180 años.

Desarrollo de la actividad: En la práctica se observarán y analizarán distintos mapas físicos de diferentes regiones del mundo. La región concreta es indiferente y puede adaptarse al nivel de los alumnos, pero debe incorporar el ángulo de declinación (Fig. 9) y la intensidad de campo, que previamente se incorporará al mapa. Esta información puede consultarse, por ejemplo, en <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/> dónde se indican la intensidad y declinación, entre otros parámetros, para distintas ciudades del mundo. Se recomienda un mínimo de cinco mapas repartidos homogéneamente por el globo⁸.

Se pedirá a los asistentes que sitúen las regiones en un mapamundi e interpreten como varía la intensidad y la declinación. Se obtendrá el mapamundi con las declinaciones e intensidades de los mapas y se interpretará que ambos parámetros son mayores en las regiones cercanas a los polos y menores en zonas ecuatoriales. La Fig. 9 muestra un ejemplo de cómo colocar la información de los mapas físicos en el mapamundi.

Cuestiones para el debate⁹:

- ¿A qué latitudes la intensidad del campo magnético es mayor? ¿Por qué?
- ¿A qué latitudes la intensidad del campo magnético es menor? ¿Por qué?
- ¿Es regular este comportamiento?
- ¿En qué latitud la declinación es mayor? ¿Y menor?
- Si nos desplazamos por el planeta sobre el mismo paralelo ¿cambia la declinación magnética?

La temperatura de Curie

Contenidos: Determinados minerales presentan propiedades magnéticas cuando se encuentran por

⁷ La unidad de medida de la intensidad magnética en el Sistema Internacional es la Tesla, aunque también se utilizan los Gauss, si se emplea el sistema CGS.

⁸ Más información en: <http://www.topoquest.com/> (mapas de EEUU).

⁹ El anexo recoge las cuestiones con una respuesta poco obvia o evidente.



Fig. 7: Materiales necesarios para la práctica.

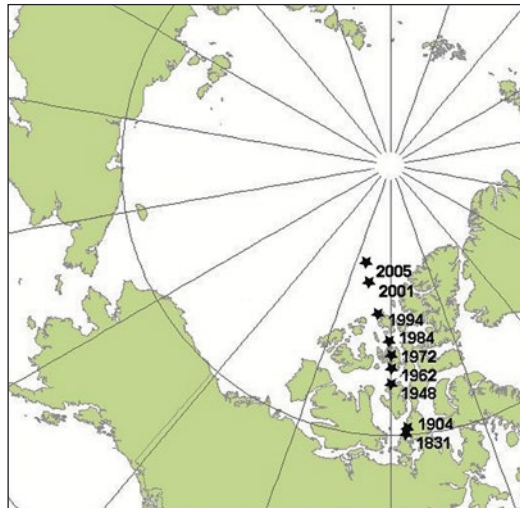


Fig. 8: Variación de la posición del Polo Norte magnético en las últimas décadas. (Fuente: Nacional de Vida Silvestre de Kenai)

debajo de un valor térmico específico, denominado temperatura de Curie.

Objetivos: Experimentar el comportamiento de un metal magnético cuando se le aplica calor para descubrir como pierde el magnetismo cuando supera una cierta temperatura.

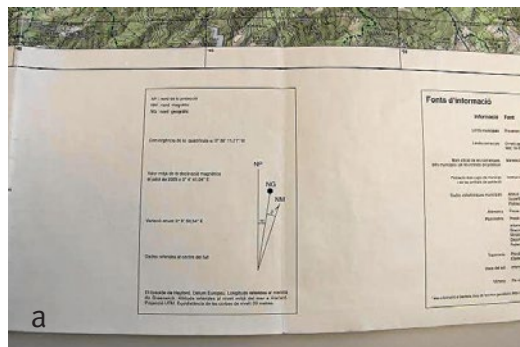
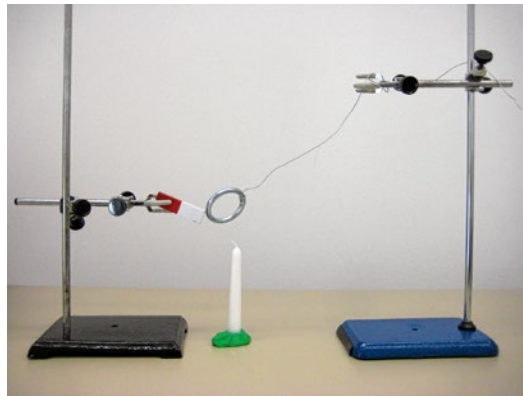


Fig. 9: a. Mapa con ángulo de declinación. b. Mapamundi con la declinación e intensidad de distintas regiones del planeta.

Fig. 10: Materiales necesarios para la práctica.



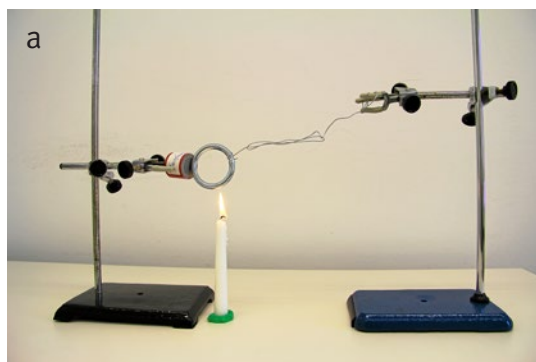
Conocimientos previos: Conocer diferentes tipos de minerales en función de sus propiedades magnéticas y las distintas características que pueden presentar. Los minerales se clasifican en diamagnéticos (cuando todos los orbitales en una molécula están completos, los momentos magnéticos de los electrones se cancelan entre ellas y el momento total es nulo), paramagnéticos (cuando no todos los orbitales en una molécula están completos y los electrones desapareados no interactúan entre ellos aunque tienen un momento magnético libre) y los ferromagnéticos (cuando no todos los orbitales en una molécula están completos y los electrones desapareados son cercanos, se alineándose el momento magnético).

Material: Dos soportes con nuez, hilo metálico, imán, anillo de hierro, cerilla, vela y plastilina (Fig. 10).

Fundamentos: Un material ferromagnético tiene la propiedad de alinearse con el campo magnético al cual es sometido si su temperatura disminuye por debajo de un determinado valor. Si la temperatura asciende lentamente, los materiales ferromagnéticos perderán el magnetismo anterior adquirido. Esta temperatura, o punto de Curie, es característica de cada mineral (Acosta, 2009).

Desarrollo de la actividad: En uno de los soportes se coloca un imán y en el otro un anillo de hierro atado a un hilo metálico, para que no se quemara al calentar el anillo, como se muestra en la Fig. 10. Debajo del anillo se enciende una vela. La temperatura del anillo irá subiendo hasta llegar a la temperatura de Curie. En ese momento, perderá la propiedad magnética y se "soltará" del imán¹⁰ (Fig. 11). No tocar el anillo hasta que esté frío.

Fig. 11: a. Inicio del experimento, el anillo tiene una temperatura baja. b. Final del experimento, el anillo ha llegado a la temperatura de Curie.



Cuestiones para el debate¹¹:

- ¿Por qué se desmagnetizan los minerales a una cierta temperatura?
- ¿Qué tipo de rocas conocemos que tengan una temperatura elevada y luego puedan enfriarse?
- ¿Qué procesos geológicos pueden producir un incremento de temperatura que haga perder la magnetización de sus minerales?
- ¿Qué procesos geológicos conllevan una disminución de la temperatura hasta situarla por debajo del punto de Curie?

Bandas magnéticas del fondo oceánico

Contenidos: Ciertas rocas contienen minerales capaces de adquirir una magnetización (llamada magnetización remanente) estable a escalas de tiempo largas y que está directamente relacionada con el campo magnético presente durante su formación. La magnetización remanente puede detectarse con magnetómetros muy sensibles.

Objetivos: Observar el paleomagnetismo como una evidencia de la teoría de la tectónica de placas.

Conocimientos previos: Conocer diferentes tipos de minerales en función de sus propiedades magnéticas y las distintas características que pueden presentar. Los minerales se clasifican en diamagnéticos, paramagnéticos y los ferromagnéticos. Conocimientos básicos sobre la teoría de la tectónica de placas y de la expansión del fondo oceánico.

Material: Bolígrafo, alfileres, brújula, hojas blancas, imán y cartón (Fig. 12).

Fundamentos: Trabajando con el modelo simplificado de imán no se explicaría por qué los polos magnéticos cambian de posición con el tiempo, o por qué se invierte la polaridad a intervalos de tiempo no regulares. La evidencia que tenemos para decir que existen dichas inversiones es el paleomagnetismo, que ha quedado registrado en la mayoría de las rocas que contienen algún mineral ferromagnético.

Por ejemplo, cuando las lavas se enfrían, pueden conservar la dirección del magnetismo terrestre en el momento de su formación (Stern, 2002). Pero algunas rocas sedimentarias también preservan el campo magnético terrestre, cuando los sedimentos de grano muy fino se depositan en una cuenca sedimentaria (lagos, estuarios, fondos abisales, etc.) y durante la decantación en los medios de baja energía se acumulan en el fondo con la misma orientación del campo



¹⁰ Más información: https://www.youtube.com/watch?v=N-4PMAv_ynA

¹¹ El anexo recoge las cuestiones con una respuesta poco obvia o evidente.

magnético del momento. Por lo tanto, los estudios paleomagnéticos pueden realizarse, sobre todo, en rocas volcánicas y, ocasionalmente en ciertas rocas sedimentarias (lutitas, limolitas, calizas de grano fino). Con la ayuda de métodos y técnicas radiométricas se ha reconstruido la escala magnetoestratigráfica de ámbito global. Desde este punto de vista, el paleomagnetismo puede ser considerado como un método de datación absoluta. El uso de instrumentación muy precisa, junto a técnicas de laboratorio permite establecer la orientación, polaridad e intensidad del magnetismo de las rocas. Esta información constituye una herramienta muy útil en la Geocronología y en la determinación de la paleo-orientación de los cuerpos rocosos.

La Fig. 13 muestra las inversiones geomagnéticas más recientes, registradas en las rocas ígneas del fondo oceánico. Este proceso ocurre en las dorsales oceánicas, cuando asciende material fundido del manto, se enfría y solidifica. Es en este momento cuando los minerales ferromagnéticos se alinean de acuerdo con la polaridad del campo magnético terrestre, ya que su temperatura es inferior a la de Curie. En esta figura también se observan diferentes bandas negras y blancas que representan la alternancia de rocas con diferente polaridad que se corresponden con períodos temporales en el registro geológico, llamados crones. Los dos últimos crones reciben el nombre de Matuyama (entre 2.580.000 – 780.000 millones de años) y Brunhes (780.000 años – presente). Todos los crones son una división mayor, que a su vez puede contener inversiones con una duración muy corta de tiempo, llamados subcrones o excursiones.

Dentro del cron Brunhes se han registrado los subcrones: *Big Lost* (570.000 - 560.000 años), *Calabrian Ridge 2* (525.000 – 515.000 años), *Calabrian Ridge 1* (325.000 - 315.000 años), *Jamaica* (215.000 – 205.000 años), *Blake* (120.000 - 110.000 años) y la más reciente *Laschamp* (45.000 – 40.000 años) (Lanza y Meloni, 2006). Aun así, en la actualidad no se conocen rocas del registro paleomagnético del fondo oceánico con edades anteriores al Jurásico.

Desarrollo de la actividad: Para simular las bandas magnéticas existentes en la corteza oceánica, unos días antes pondremos alfileres sobre un imán. Debemos procurar que todos queden alineados en el mismo sentido para que se magneticen con idéntica polaridad. Antes del taller colocaremos en dos cartulinas los alfileres imantados. Es muy importante que estos se dispongan de manera simétrica en las dos cartulinas, alternando de un modo regular el sentido de su magnetización como muestra la Fig. 14. Los

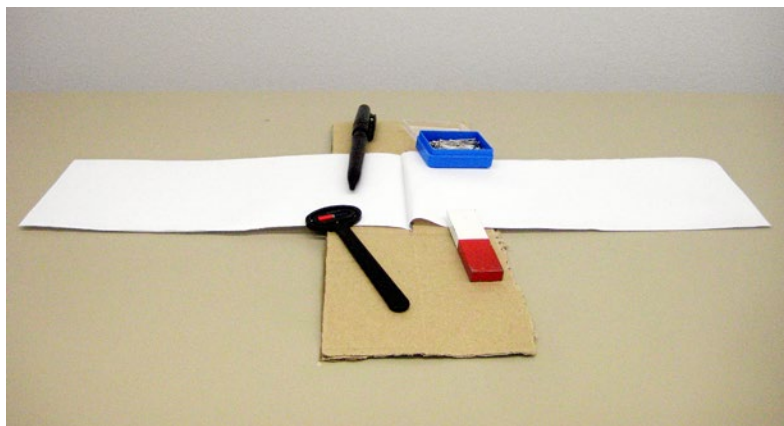


Fig. 12: Materiales necesarios para la práctica.

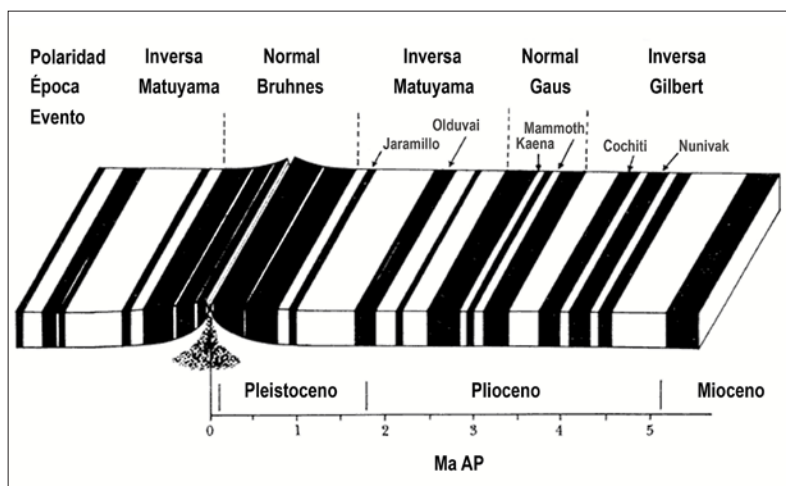


Fig. 13: Inversiones geomagnéticas recientes. (Fuente: <http://proyectohumano.argentinaforo.net/>)

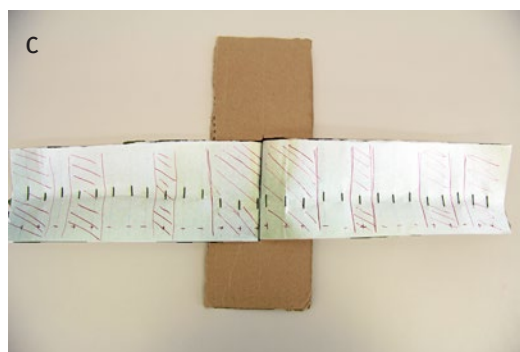
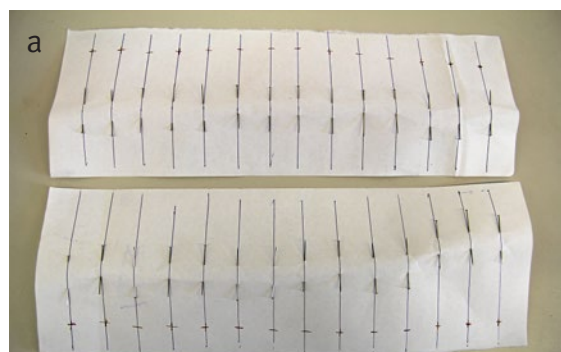
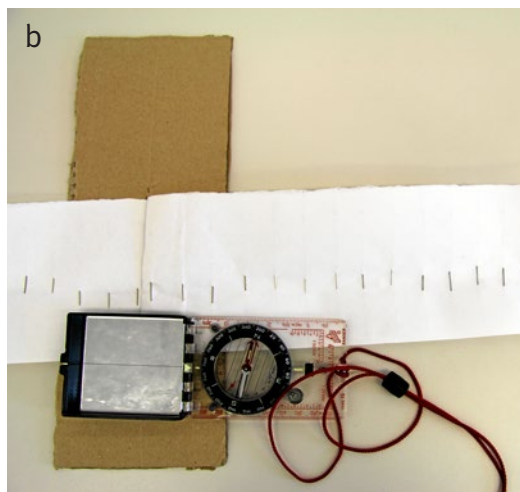


Fig. 14: a. Preparación del modelo analógico con las agujas equidistantes y simétricas en ambas cartulinas. b. Cartulinas giradas comprobando la orientación de los alfileres. c. Dibujo de las bandas magnéticas.

participantes mediante una brújula observaran la polaridad de los alfileres, dibujando bandas de dos colores distintos según la orientación que presenten¹².

Se pedirá a los participantes que observen la orientación del campo magnético en diferentes zonas de nuestro modelo de corteza oceánica y busquen una respuesta coherente a este comportamiento, como hicieron los científicos en su tiempo. La interpretación esperada deberá relacionar la simetría de las inversiones de las dos placas con su formación. De esa manera se visualiza el movimiento divergente.

Cuestiones para el debate¹³:

- ¿Por qué la corteza oceánica presenta simetría en las inversiones magnéticas?
- ¿Por qué motivo el paleomagnetismo es una evidencia de la teoría de la tectónica de placas?
- ¿Qué información adicional aporta un mapa con las edades de los fondos oceánicos del planeta?

La magnetosfera

Contenidos: Las auroras boreales se observan en las zonas de la Tierra donde la intensidad del campo magnético es mayor.

Objetivos: Detectar las zonas de la Tierra donde la intensidad del campo magnético es mayor y sus interacciones con el viento solar.

Conocimientos previos: El viento solar es una corriente de partículas energéticas provenientes del Sol. Buena parte de las partículas cargadas provenientes del viento solar son atrapadas en los cinturones de Van Allen. La magnetosfera terrestre es una región en la que el campo magnético desvía el viento solar. Solo un pequeño número de partículas del viento solar consigue llegar a la Tierra siguiendo el campo magnético hasta la alta atmósfera y la ionosfera produciendo las zonas aurorales.

Material: Dos tarros de cristal, uno más pequeño que el otro, imán, plastilina, aceite y limaduras de hierro (Fig. 15).

Fundamentos: El campo magnético protege a la Tierra del viento solar. Estas partículas car-



Fig. 15: Materiales necesarios para la práctica.

gadas podrían, por ejemplo, destruir la capa de ozono (Hwang *et al.*, 2012). La Fig. 16 muestra la protección proporcionada por la magnetosfera terrestre.

Una evidencia del impacto del viento solar en la Tierra son las auroras boreales, observables cerca de los polos. El Sol emite continuamente y en todas direcciones un flujo de partículas cargadas al que se llama plasma. Estas partículas se concentran en los polos porque la intensidad del campo magnético es mayor. Una parte muy pequeña de plasma llega a la ionosfera donde se producen reacciones que emiten radiación en el espectro visible. La ionosfera es una región de la alta atmósfera, por encima de la estratopausa (80-600 km de la superficie terrestre) que está fuertemente ionizada a causa de los rayos ultravioletas y la radiación de los rayos X.

Desarrollo de la actividad: Con este taller observaremos las líneas de fuerza de un campo magnético con limaduras de hierro. Se llenará tres cuartas partes de un tarro de cristal con aceite -o cualquier otro líquido: agua, glicerina, etc.- y limaduras de hierro, se pondrá dentro un tarro de cristal más pequeño con un imán en el interior. Las limaduras se orientarán en el agua siguiendo las líneas del campo magnético.

Una vez observado el campo producido por un imán, parecido al de la Tierra, los asistentes interpretarán por qué motivo se producen las auroras solamente cerca de los polos. Se originan porque el plasma es conducido a las zonas de la Tierra donde el campo magnético es más intenso¹⁴.

Cuestiones para el debate¹⁵:

- ¿En qué zonas de la Tierra la intensidad del campo es mayor?
- ¿Por qué las auroras se forman solamente cerca de los polos?
- ¿Por qué las auroras presentan tantos colores?

CONSIDERACIONES FINALES

Las actividades prácticas seleccionadas constituyen una evidencia del extraordinario potencial didáctico de los modelos analógicos en la enseñanza de la Geología en todos los niveles educativos, especialmente en la educación secundaria. En un tema como el geomagnetismo, que integra conceptos complejos de la Física y las Ciencias de la Tierra, el enfoque práctico puede favorecer un aprendizaje más significativo.

Las experiencias propuestas repasan algunos contenidos básicos sobre el geomagnetismo. A la vista de las dudas que todavía persisten sobre su origen, mantenimiento y evolución, las actividades también otorgan un protagonismo especial a los va-

¹² Más información en: www.earthlearningidea.com – Bandas magnéticas; Un modelo de las bandas de paleomagnetismo de los fondos oceánicos.

¹³ El anexo recoge las cuestiones con una respuesta poco obvia o evidente.

¹⁴ Más información: http://digital.csic.es/bitstream/10261/75136/1/hum3lopez_moreno.pdf (Líneas de fuerza en tres dimensiones). <http://www2.le.ac.uk/departments/physics/outreach/planeterrella> (simulación de auroras boreales).

¹⁵ El anexo recoge las cuestiones con una respuesta poco obvia o evidente.

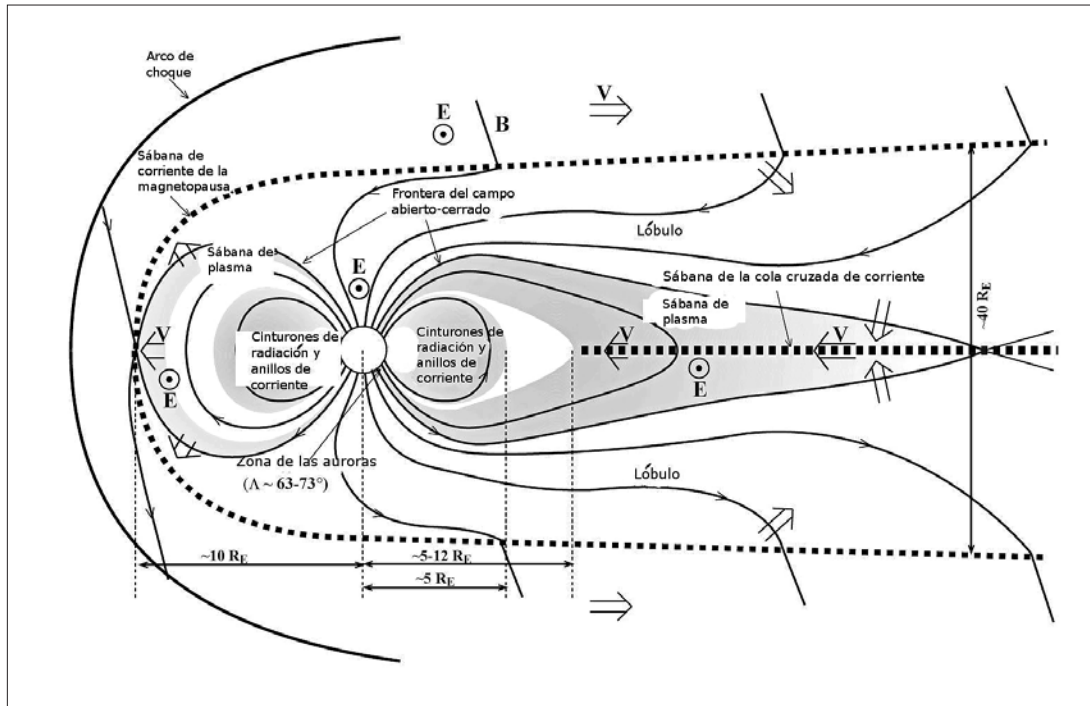


Fig. 16: Diagrama esquemático de la magnetósfera terrestre. La Tierra es el círculo que se encuentra ubicado cerca del centro. (http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2009/17dec_whenaurorascollide/) Crédito: Larry Lyons/ UCLA

lores y actitudes científicas, que derriban la percepción de la ciencia como un dogma.

Los modelos teóricos son representaciones abstractas que, a menudo, los alumnos no incorporan y preservan modelos previos generados normalmente por el sentido común (De Asís, 2010). Mediante las actividades prácticas los estudiantes se involucran en la construcción de relaciones entre lo abstracto y lo concreto y, al mismo tiempo, elaboran un lenguaje específico y una manera apropiada de pensar (Sensevy, 2008).

En síntesis, los conceptos tratados a través de las actividades propuestas son la detección del campo magnético terrestre, su origen, sus características principales, las propiedades de los minerales ferromagnéticos, el paleomagnetismo como evidencia de la expansión de los fondos oceánicos y la magnetosfera. Todos ellos se desarrollan mediante prácticas diferenciadas amoldables a criterio del docente y complementados con una lista de cuestiones para el debate para profundizar en cada concepto y mejorar su aprendizaje. Así pues, contribuyen a consolidar los conocimientos de los profesores y alumnos sobre el geomagnetismo y, de ese modo, proporcionan una buena alternativa para abordar el tema de forma práctica y atractiva.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta, R.A. (2009). Determinación de la temperatura de Curie a partir del uso de la aleación Monel. *Revista científica. UNINCCA* 14.2, 59-68.

De Asís, F. (2010) Analogías utilizadas habitualmente en la enseñanza de química básica en la ESO. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 64, 86-98.

De la Torre, A. (2009). Sobre los efectos de las escalas lentas en la magnetohidrodinámica de un flujo de von Kármán. *Universidad de Navarra*, 12 y 13p.

Diego Rasilla, F.J. (2004). Orientación animal basada en

el campo magnético terrestre. *Ciencias planetarias*, 22-27p.

Dormy, E. (2006). The origin of the Earth's magnetic field: fundamental or environmental research?. *Europhysics news*, 37.2, 22-25.

Fanjul de Moles, M.L. y de Oyarzábal, A. (2007). Navegación animal. *Investigación y Ciencia*. 375, 66 – 77.

García-Montoya, F. (1999). Investigación sobre algunos aspectos del campo magnético terrestre. Implicaciones didácticas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 72, 121-130.

Granda Vera, A. (1988). Esquemas conceptuales previos de los alumnos en geología. *Enseñanza de las Ciencias*, 6.3, 239-243.

Guisasola, J., Almodí, J.M. y Ceberio, M. (2003). Concepciones alternativas sobre el campo magnético estacionario. Selección de cuestiones realizadas para su detección. *Enseñanza de las Ciencias*, 21.2, 281-293.

Hwang, K.J., Goldstein, M.L., Kuznetsova, M.M., Want, Y., Viñas, A.F. y Sibeck, D.G. (2012). The first in situ observation of Kelvin-Helmholtz waves at high-latitude magnetopause during strongly downward interplanetary magnetic field conditions, *the Journal of Geophysical Research*, 117p.

Lanza, R., y Meloni, A. (2006). The Earth's Magnetism. An Introduction for Geologist. Ed. Springer, 48 – 58 y 66 p.

Lewis, A. (2010). Monitoring Earth's changing magnetic field. New geomagnetic field model released. *Geoscience Australia*, 98, 1-4.

Pedrinaci, E., Alcalde, S., Alfaro, P., Almodóvar, G., Barrera, J.L., Belmonte, Á., Brusí, D., Calonge, A., Cardona, V., Crespo-Blanc A., Feixas, J.C., Fernández-Martínez, E., González-Díez, A., Jiménez-Millán, J., López-Ruiz, J., Mata-Perelló, J., Pascual, J.A., Quintanilla, L., Rábano, I., Rebollo, L., Rodrigo, A. y Roquero, E. (2013). Alfabetización en ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 117-129.

Sensey, G., Tiberghien, A., Santini, J. y Griggs, P. (2008). An epistemological approach to modeling: Cases studies and implications for science teaching. *Science Education* 92(3), 424 - 446.

Stern, D. (2002). A millennium of geomagnetism. *Reviews of Geophysics*, 40.3, 1-30.

ANEXO

El presente anexo recoge las cuestiones que tienen una respuesta menos evidente, salvo que el docente conozca bien la disciplina del geomagnetismo, con la intención de aclarar las dudas que pueda tener el lector. El objetivo no es dar una respuesta detallada, más bien se trata de obtener una explicación a partir de los resultados del experimento o actividad.

¿Por qué en el campo magnético de la Tierra domina un dipolo axial?

Un campo magnético siempre presenta dos polos que tienen la misma intensidad y signo opuesto. El dipolo es la estructura magnética elemental. Una experiencia recurrente en física para comprender esta propiedad es romper una barra magnética. Cuando se rompe los polos no quedan separados, sino que aparecen los dos en cada pedacito de barra.

El dipolo terrestre presenta una dirección similar a la del eje de rotación, llamado axial porque es simétrico alrededor de un eje.

¿Cómo se genera el campo magnético?

Un campo magnético puede estar generado por un material/mineral ferromagnético, o bien, por un movimiento circular de electrones. Estas dos opciones serían nuestras hipótesis de partida. Mediante métodos científicos indirectos se ha estudiado el interior de la Tierra, comprobando que el núcleo externo presenta un comportamiento fluido, y los fondos oceánicos, donde el paleomagnetismo muestra la existencia de inversiones magnéticas.

Estas dos evidencias respaldan la teoría de que un flujo de electrones en el núcleo externo de la Tierra genera el campo magnético. Por lo tanto, el campo magnético terrestre no está generado por una barra magnética en su interior. Este flujo de electrones puede estar causado por el intercambio de energía calorífica entre el núcleo-manto y por el movimiento de rotación de la Tierra.

¿La intensidad del campo magnético presenta un comportamiento regular?

La intensidad es una propiedad magnética definida como la densidad de líneas de fuerza del campo magnético en una superficie (unidad: nano Tesla o Gauss). En la Tierra la intensidad es mayor en los polos y menor en el ecuador. El ecuador magnético es la isolínea de inclinación cero (el campo magnético es horizontal).

De todas formas, la variación de la intensidad no es igual en todo el globo, en ciertas zonas hay anomalías magnéticas causadas por yacimientos de minerales magnéticos en la corteza terrestre o irregularidades en el manto.

¿Por qué se desmagnetizan los minerales a una cierta temperatura?

Algunos materiales contienen elementos químicos de transición (Fe, Co, Ni, etc.). Estos elementos presentan una gran densidad de electrones y se produce una superposición de electrones entre orbitales. Las fuerzas provocan una alineación magnética de los spines de los electrones. La in-

tensidad de esta alineación magnética depende de la distancia en la red cristalina. Esta distancia crece cuando aumenta la temperatura, ya que la superposición de electrones es menor.

La superposición de electrones será cero cuando se llega a una cierta temperatura (temperatura de Curie), característica de cada sustancia.

¿Por qué la corteza oceánica presenta simetría en las inversiones magnéticas?

La simetría se explica porque en su eje se encuentra un límite de placa divergente, denominado dorsal. En este límite se genera nueva corteza oceánica que favorece que las dos placas tectónicas se separen progresivamente. Por ello, las rocas más antiguas se encuentran siempre en las zonas más alejadas de la dorsal.

Los minerales ferromagnéticos preservan el campo en el momento de su cristalización. La corteza oceánica que se forma a cada lado de la dorsal registra la polaridad del campo magnético del momento en que se solidifica y así se van formando las bandas magnéticas.

¿Por qué motivo el paleomagnetismo es una evidencia de la tectónica de placas?

El registro paleomagnético de la corteza oceánica muestra que su formación es dinámica, ya que, la intensidad y el sentido de los minerales ferromagnéticos no es el mismo. Además, el paleomagnetismo de la corteza oceánica presenta simetría a cada lado de las dorsales oceánicas. Se puede deducir que las diferentes bandas se formaron en el límite divergente y al paso del tiempo se han ido separando.

¿Por qué las auroras se forman solamente cerca de los polos?

La magnetosfera se encuentra en la exosfera, la zona más externa y amplia de la atmósfera terrestre. Cuando las partículas cargadas del Sol se acercan a la Tierra la fuerza del campo magnético las conduce hasta los polos porque la intensidad es mayor. Las partículas cargadas en estas zonas penetran en la atmósfera y en la ionosfera chocan contra los átomos que la forman. Las diferentes tonalidades que conforman las auroras se generan según el átomo con el que se encuentra, el rojo es nitrógeno y el verde oxígeno, por ejemplo. Los colores se observan al decaer el electrón que las partículas del viento solar han excitado previamente. ■

Este artículo fue recibido el día 20 de abril y aceptado definitivamente para su publicación el 9 de junio de 2014.