

UN EXPERIMENTO SENCILLO PARA ILUSTRAR LAS INVERSIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Violeta Ortiz-Olvera^{1*} y Thierry Calmus¹

¹Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Luis Donaldo Colosio y Madrid S/N, Campus UNISON, Hermosillo, Sonora, México, C.P. 83000. *violet.13.tierra@gmail.com

RESUMEN

Entender y divulgar los procesos geológicos representa una dificultad pedagógica por múltiples razones, entre ellas la necesidad de conocer conceptos de diversas ciencias básicas para explicar cada proceso. Es el caso de los fenómenos relacionados con la Tectónica de Placas, como la formación de nueva corteza oceánica y cómo ocurre el desplazamiento de los continentes conforme crece el piso oceánico. Este artículo presenta un experimento sencillo, accesible y de bajo costo que permite visualizar y entender el origen, la generación y la migración de las anomalías magnéticas que se forman en las dorsales oceánicas. El experimento se acompaña de una explicación de los conceptos básicos como el campo magnético terrestre, el proceso de magnetización, la magnetización termorremanente y la estructura de la dorsal oceánica. También se resaltan las implicaciones que se tuvieron para entender este proceso durante el desarrollo de la teoría de la Tectónica de Placas.

Palabras clave: Campo magnético terrestre, piso oceánico, anomalías magnéticas, dorsal, experimento.

ABSTRACT

The understanding of geological processes represents a challenge for many reasons, including the appropriate handling of concepts from many sciences. This is the case of the phenomena related to Plate Tectonics such as oceanic accretion, which causes the creation of new oceanic crust and the displacement of the continents. This article presents the implementation of a simple experiment that allows visualizing and understanding the origin, generation and migration of magnetic anomalies forming parallel along of mid-ocean ridges. The experiment is accompanied by an explanation of basic concepts such as the Earth's magnetic field, the magnetization process, thermoremanent magnetization and the structure of an oceanic ridge. Additionally, the relevance of these concepts in the Plate Tectonics development is highlighted. The material needed for the experiment is very accessible and cheap.

Key words: Earth's magnetic field, ocean floor, magnetic anomalies, ocean ridge, experiment.

INTRODUCCIÓN

La Tierra es un sistema dinámico constituido por varios sistemas que se diferencian por múltiples características, como la densidad, la temperatura y la composición química. Además, cada capa interactúa de forma directa o indirecta con las otras, como es el caso de la corteza con el manto y el manto con el núcleo (Tarbuck *et al.*, 2015). De tal manera que muchos fenómenos naturales son el resultado de la interacción de varias capas. Por esta razón que es necesario estudiar cada fenómeno natural en un contexto general, tomando en cuenta todos los componentes, lo cual requiere de una visión multidisciplinaria (Tarbuck *et al.*, 2015).

Un ejemplo de un fenómeno que requiere de este tipo de visión multidisciplinaria es la distribución simétrica de las anomalías magnéticas en el piso oceánico. Una anomalía es la desviación entre la medición magnética en un punto y el valor teórico esperado del campo magnético. Conviene subrayar que el arreglo de las anomalías tuvo una gran importancia en el entendimiento de la dinámica de la Tierra y para el desarrollo de la teoría de la Tectónica de Placas, porque permitió entender la creación simétrica de nueva corteza oceánica a nivel de las dorsales oceánicas, así como cuantificar la velocidad y dirección del movimiento de las placas tectónicas (Vine y Matthews, 1963; Turcotte y Schubert, 2002).

Con el objetivo de ilustrar este fenómeno terrestre, se realizó el diseño de un experimento que modela la expansión del piso oceánico y las inversiones magnéticas. La magnetización es un fenómeno que resulta en primera instancia del movimiento de convección y de rotación del núcleo exterior, el cual genera el campo magnético terrestre. Se buscó ofrecer un experimento sencillo que sea aplicable desde el nivel de secundaria, cuando se da a conocer a los alumnos el concepto de la Tectónica de Placas. Además de construir un modelo, se buscó desarrollar la habilidad de observación de un fenómeno en condiciones controladas, entender las causas del fenómeno, para luego correlacionarlo con el fenómeno natural que ocurre en la Tierra. En suma, los aprendizajes que se buscan alcanzar son: 1) conocer la existencia de las inversiones del campo magnético terrestre; 2) conocer el mecanismo de registro del campo magnético en las rocas; 3) entender el patrón de las anomalías magnéticas en el piso oceánico y 4) explicar cómo ayudaron las inversiones del campo magnético terrestre a explicar el movimiento de los continentes.

METODOLOGÍA

Para la construcción del modelo se utilizan materiales que son de fácil acceso (Tabla 1). Salvo la limadura de hierro, el resto de los materiales como el papel, el cartón, la vela y el imán son materiales de fácil acceso y de bajo precio. Además, su construcción es bastante sencilla, solo se necesita una base de cartón con un espacio abajo donde entre la mano de la persona que realiza el experimento. Lo demás se realiza sobre el cartón y no es necesaria una preparación adicional. Así pues, el modelo fue diseñado para que fuera claro observar cómo se expande el piso oceánico de ambos lados de las dorsales oceánicas. El video del modelo está disponible en el siguiente enlace:

<https://youtu.be/u23tt4h3RS4>

Para empezar, se requiere una base de cartón con una ranura alargada (Figura 1A) que representa la dorsal oceánica por donde se hacen pasar dos tiras de papel dirigidas hacia cada lado (Figura 1B). Luego, se distribuyen las limaduras de hierro sobre el papel y se coloca el imán por debajo del cartón (Figura 1C). Como resultado las limaduras se van a orientar de forma paralela al campo magnético del imán y después se vierte cera líquida sobre ellas (Figura 1C). Una vez endurecida la cera, la orientación de las limaduras se mantendrá fija. A continuación, las tiras de papel se jalan hacia lados opuestos, y la cera se divide en dos, recorriéndose perpendicularmente de ambos lados de la dorsal como franjas paralelas a la misma dorsal. El proceso se realiza varias veces, invirtiendo la orientación del imán en cada fase.

El experimento consta de dos etapas. La primera consiste en generar un patrón moviendo el imán y la segunda en generar otro patrón moviendo la base de cartón (Figura 2). En cada etapa del experimento se hace una analogía con el proceso real. Además, se menciona que las anomalías magnéticas son un registro del campo magnético durante el crecimiento del piso oceánico, lo cual fue una de las bases más sólidas

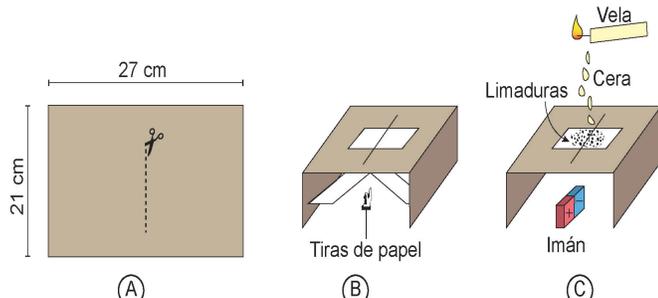


Figura 1. A) Esquema de las dimensiones del cartón, así como de la ubicación de la ranura. B) Las dos cintas de papel se introducen en la ranura. C) Ubicación de todos los objetos necesarios para este experimento.

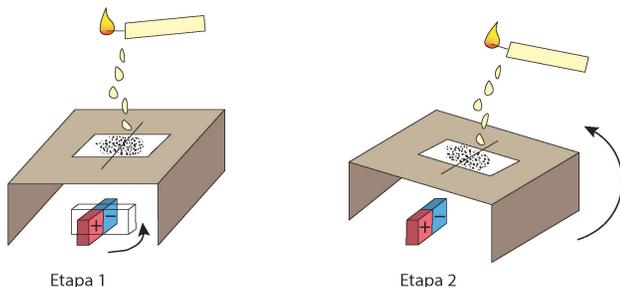


Figura 2. Etapa 1) en la primera etapa el experimento consiste en girar el imán ubicado por debajo del cartón. Etapa 2) en esta etapa el experimento consiste en girar el cartón y mantener fijo el imán. Ubicación de todos los objetos necesarios para este experimento.

para el desarrollo de la teoría de la Tectónica de Placas (Véase el video de este experimento en: <https://youtu.be/u23tt4h3RS4>)

Tabla 1. Lista de materiales

• Pedazo de cartón	Dimensiones: 27 cm x 21 cm
• 4 tiras de papel bond	Dimensiones: 27 cm x 10 cm
• Una vela	
• Un imán	
• Limadura de hierro	Aproximadamente 100 g

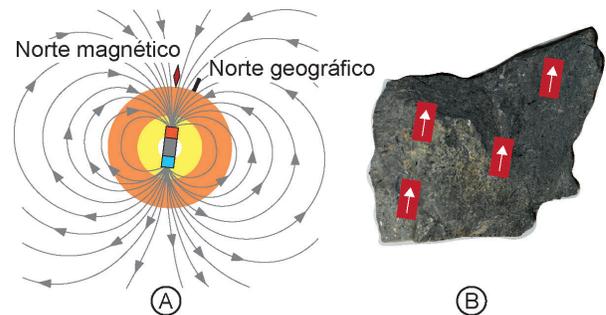


Figura 3. A) Representación del campo magnético terrestre, se observa que el polo norte magnético es distinto del polo norte geográfico. El campo magnético terrestre se origina en el núcleo terrestre. B) La magnetización termoremanente en las rocas se forma cuando los minerales magnéticos se orientan con respecto al campo magnético terrestre durante el enfriamiento.

PROPUESTA DEL EXPERIMENTO

Antes de realizar el experimento es necesario presentar algunos conceptos para entender la analogía del modelo con la realidad. En primer lugar, el campo magnético terrestre se origina en el núcleo externo líquido, y es similar al campo generado por un dipolo magnético (Figura 3A) colocado en el centro de la Tierra cuya polaridad se invierte cada cierto tiempo por motivos aún no bien entendidos, probablemente relacionados con el sentido del movimiento del material en el núcleo externo, o con las interacciones entre núcleo interno y externo. En el experimento, se recrea el campo magnético

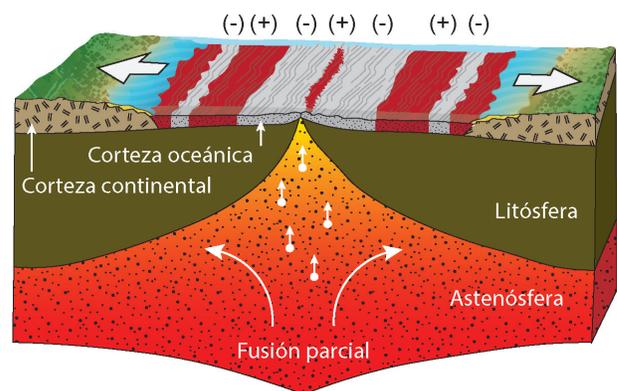


Figura 4. Esquema de las partes de una dorsal oceánica. En una dorsal oceánica se forma nueva corteza oceánica y manto litosférico por el ascenso de magma proveniente de la astenósfera que se forma por fusión parcial. El espesor de la litosfera aumenta proporcionalmente alejándose de la dorsal oceánica. El movimiento relativo opuesto de las placas deja permanentemente un espacio a nivel de la dorsal, lo cual permite la subida de material astenosférico hasta la superficie. El piso oceánico tiene un patrón simétrico paralelo a la dorsal de anomalías magnéticas positivas y negativas. Modificada de Tarbuck y Lutgens (2015) y Turcotte y Schubert (2002).

con un imán. En segundo lugar, las rocas que forman el piso oceánico provienen de magmas que se generan en el manto astenosférico y se emplazan a lo largo de las dorsales, para formar franjas de corteza oceánica que van desplazando a las rocas formadas en un episodio anterior (Figura 4). En realidad, este fenómeno es continuo a escala geológica, pero las anomalías dan la falsa impresión de que la acreción se produce durante etapas discretas o discontinuas (Figura 4). Durante el enfriamiento del magma, los minerales magnéticos se alinean paralelamente con la dirección del campo magnético terrestre (Figura 3B). Este fenómeno es semejante al que ocurre cuando una aguja de una brújula se alinea con el campo magnético terrestre. Por lo anterior, en las rocas queda un registro del campo magnético existente al momento de su enfriamiento, llamado magnetización

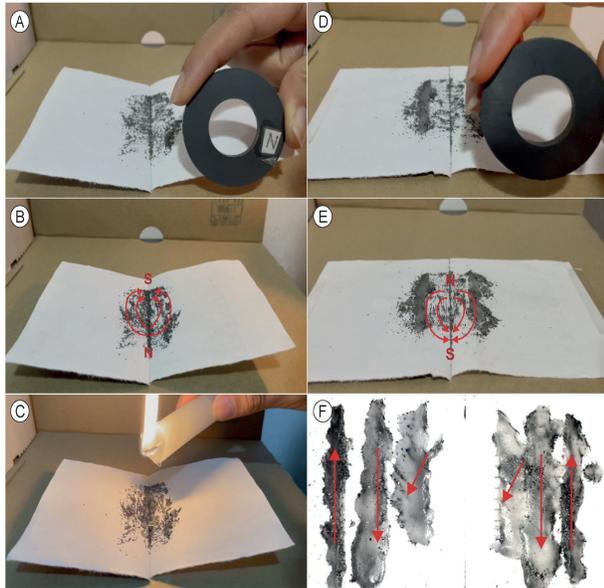


Figura 5. Capturas de pantalla del experimento en video. A) Muestra de la orientación del imán que se ubicará por debajo del cartón. B) Limaduras de hierro orientadas de acuerdo con el campo magnético del imán. Las flechas rojas indican el sentido de las líneas de fuerza y ubicación de los polos magnéticos. C) Momento en que se vierte cera derretida sobre las limaduras orientadas. D) El siguiente paso muestra cuando se invierte la orientación del imán, se rotó 180°. E) limaduras de hierro libres orientadas con el imán en su nueva posición. La cera fría del paso anterior se encuentra en los bordes. F) Patrón final obtenido con 3 pasos. Las limaduras contenidas en la cera tienen tres orientaciones distintas y son simétricas respecto al centro de las hojas.

termorremanente. El estudio de la magnetización fósil en las rocas, o paleomagnetismo, permite reconstruir la evolución del piso oceánico y de su migración paulatina desde las dorsales oceánicas (Figura 4). En particular, se descubrió que, en el fondo marino las medidas hechas por magnetómetros indicaron que las rocas formaban bandas simétricas con respecto a la dorsal y estaban intercaladas con polaridad normal e inversa.

La primera etapa del experimento representa el proceso de expansión oceánica que ocurre en las dorsales oceánicas. Es decir, la ranura por donde salen las tiras del papel representa el eje de la dorsal; jalar las tiras de papel representa la expansión del piso oceánico; la limadura representa los minerales ferromagnesianos; y el imán representa el campo magnético terrestre (Figura 5A). Al verterlas, las limaduras se orientan con el campo magnético del imán (Figura 5B). Verter la cera es análogo a la acreción del magma a lo largo del eje de la dorsal (Figura 5C). El enfriamiento de la cera representa el enfriamiento del magma y las limaduras representan

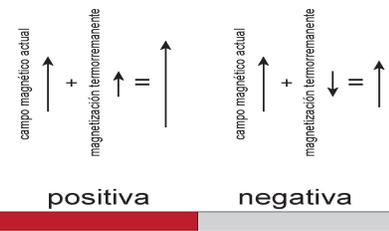


Figura 6. La anomalía magnética positiva corresponde a una orientación de la magnetización termorremanente en el mismo sentido que el campo magnético actual. Al contrario, la anomalía negativa indica que la magnetización termorremanente es opuesta a la imantación del campo magnético actual. Modificado de Larroche y Virieux (2001).

los minerales orientados con el campo magnético del imán. El cambio en la polaridad del imán cuando lo rotamos 180° representa el fenómeno de inversión del campo magnético terrestre (Figuras 5D y 5E). De esta manera, el resultado final está constituido por dos tiras de papel con un patrón simétrico de cera y limaduras con respecto a la ranura que representa la dorsal (Figura 5F). Este patrón es el reflejo de la distribución simétrica del piso oceánico con respecto a las dorsales oceánicas.

El campo magnético que se mide en algún punto del piso oceánico es entonces la resultante del campo magnético actual y de la magnetización termorremanente. Si el campo magnético y la magnetización termorremanente están en el mismo sentido, se mide una anomalía magnética positiva o normal (Figura 6). Al contrario, si están en sentidos opuestos, se detecta una anomalía negativa o invertida (Figura 6).

Así pues, en este experimento se relacionaron las anomalías magnéticas con el fenómeno ya conocido de inversión del campo magnético de la Tierra. Los estudios paleomagnéticos del piso oceánico durante la década de los 1960's mostraron un patrón

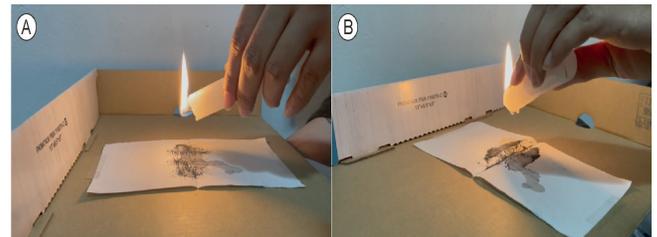


Figura 7. Capturas de pantalla del experimento en la segunda etapa. A) primer paso del experimento con el cartón en su posición original. B) segundo paso con el cartón rotado. En este caso el imán no cambia de posición.

simétrico en las anomalías magnéticas respecto a la dorsal oceánica. Vine y Matthews (1963) relacionaron directamente las anomalías magnéticas con la inversión del campo magnético terrestre. Posteriormente, otros estudios determinaron la edad de las rocas del piso oceánico, de tal manera que se estableció una escala temporal de las anomalías magnéticas. De ahí fue posible, conociendo la edad y la distancia de una anomalía magnética a la dorsal, calcular la velocidad de expansión del piso oceánico (Turcotte y Schubert, 2002).

Finalmente, el estudio de las dorsales oceánicas y las anomalías magnéticas ayudaron a entender los procesos de expansión de la litósfera del planeta. Eso tuvo grandes implicaciones en el desarrollo de la teoría de la Tectónica de Placas porque aclaró el fenómeno de la deriva de los continentes (Turcotte y Schubert, 2002).

La segunda parte del experimento consiste en volver a generar un patrón de anomalías, pero ahora moviendo la base de cartón (Figura 7A). En cada paso, primero se cambia la posición del cartón, se esparce la limadura, se coloca el imán por debajo en una posición fija para orientar las limaduras y se vierte la cera en el eje de la ranura (Figura 7B). Con esta segunda parte del experimento se pone en evidencia que el cambio en las orientaciones de las anomalías también está relacionado con el cambio de orientación de la dorsal.

El paleomagnetismo no solamente estudia las anomalías magnéticas termorremanentes, sino que también estudia la orientación de la magnetización en otras rocas, en particular continentales. La variación aparente de la orientación del campo magnético fósil corresponde a un desplazamiento de las rocas con respecto a su posición original. Es la técnica que se utiliza para reconstruir las trayectorias de los continentes en el pasado (Turcotte y Schubert, 2002).

CONCLUSIÓN

Se propone un experimento innovador que busca explicar un fenómeno terrestre relacionado con la teoría de la Tectónica de Placas. A través de un modelo analógico, se muestra el origen, la generación y la migración de las anomalías magnéticas en el piso oceánico. Este modelo tiene la ventaja de ser accesible y sencillo. Al mismo tiempo, se introducen conceptos geológicos como las anomalías magnéticas, el paleomagnetismo, el magnetismo remanente y la expansión del piso oceánico cuya enseñanza representa un reto pedagógico. Además, a través del ejemplo del paleomagnetismo se busca fomentar la capacidad de observación, de razonamiento científico y de construcción de conocimiento.

El video está disponible en el siguiente enlace:

<https://youtu.be/u23tt4h3RS4>

AGRADECIMIENTOS

Violeta Ortiz agradece al Diplomado en Enseñanza de Ciencias de la Tierra y en especial a la doctora Susana Alaniz Álvarez por brindar una enseñanza tan amena y sensible, aún en tiempos pandémicos. Este experimento es fruto de la creatividad incentivada por la Dra. Alaniz-Álvarez para no limitarse a intentar enseñar temas que aparentemente son complejos. Gracias al Ing. Emiliano Morones por su apoyo en la construcción del modelo y en la grabación del video.

REFERENCIAS

- Larroche, C., y Virieux, J. (2001) *Physique de la Terre solide, observation et théories*, Collection Géosciences. Gordon and Beach Science Publishers.
- Tarback, E.J. y Lutgens, F.K. (2015) *Earth Science*. (14ª Ed.). Pearson.
- Turcotte, D.L. y Schubert, G. (2002) *Geodynamics*. (2ª ed.). Cambridge University.
- Vine, F. y Matthews, D. (1963) Magnetic anomalies over ocean ridges. *Nature*, 199, 947-949.

Manuscrito recibido: 1 de septiembre de 2022

Manuscrito corregido recibido: 11 de noviembre de 2022

Manuscrito aceptado: 14 de noviembre de 2022