

# ¿UNA TIERRA SIN CAMPO MAGNÉTICO? UN FENÓMENO COMPRENDIDO HASTA 1919

**Francisco Chacón-Hernández**

Instituto de Geofísica, Circuito de la investigación científica s/n, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 04510, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México.

[fcochaconsalemj@gmail.com](mailto:fcochaconsalemj@gmail.com); [chaconf@igeofisica.unam.mx](mailto:chaconf@igeofisica.unam.mx)

## RESUMEN

Al día de hoy, diferentes estudios nos han permitido conocer más sobre el origen, comportamiento y funcionamiento del campo magnético de la Tierra (cmT). Este fenómeno, cuyo conocimiento ha requerido de siglos de observaciones y estudios para responder inquietudes e interrogantes milenarios, aún plantea ciertas dudas sobre su pleno funcionamiento. No obstante, durante el siglo XVII, la pregunta que muchos hacían sobre si la Tierra era en sí un campo magnético gigante que seguía los principios físicos de un imán, comenzó a ser cada vez más considerada. Esto permitió obtener a principios del siglo XX, en el año de 1919, evidencias concretas solo de carácter empírico y experimental que permitieron hacer las primeras suposiciones sobre el origen del cmT, correlacionando sus causas-efectos e integrando los diferentes tipos de mecanismos y fenómenos que ocurren en el interior y exterior de la Tierra. Por tanto, en este escrito, se volverá al pasado para intentar revisar aquellos supuestos milenarios que se hicieron sobre el magnetismo y el cmT. Así mismo, se explica de forma general y sin detalles técnicos el origen y funcionamiento del cmT, lo que en realidad representa este fenómeno y cómo éste guarda correlación con el funcionamiento total del planeta Tierra en constante evolución.

**Palabras clave:** Campo magnético de la Tierra, magnetita, auroras boreal y austral, rocas magnetizadas, polos magnéticos de la Tierra.

## ABSTRACT

*Today, different studies have allowed us to learn more about the origin, behaviour, and functioning of the Earth's magnetic field (cmT). This phenomenon, whose knowledge has required centuries of observations and studies to answer millennia-old questions and concerns still raises some doubts about its full functioning. However, during the 17th century, the question that many asked, was whether the Earth itself was a giant magnetic field following the physical principles of a magnet began to be increasingly considered. this allowed to obtain at the beginning of the 20th century, in 1919, concrete evidence only of an empirical and experimental nature*

*that allowed us to make the first assumptions about the origin of the cmT, correlating its causes-effects and integrating the different types of mechanisms and phenomena that occur in the interior and the exterior of the Earth. Therefore, this paper will go back in time to try to review those millennia-old assumptions made about magnetism and the cmT. It also explains, in a general and non-technical way, the origin and functioning of the cmT, what this phenomenon actually represents, and how it correlates with the overall functioning of the constantly evolving planet Earth.*

**Keywords:** Earth's magnetic field, magnetite, aurora borealis and australis, magnetised rocks, Earth's magnetic poles.

## INTRODUCCIÓN

**Un fenómeno difícil de entender pero no ausente**

El fenómeno del cmT ha resultado ser un tema complejo cuando se intenta entender y describir su origen o funcionamiento. Aunque el cmT sigue siendo un tema de análisis y estudio muy importante en la actualidad, las mejoras en la recopilación de datos y en el procesamiento de la información han permitido incrementar el conocimiento sobre el cmT sin que por ello deje de actualizarse o de que nuevas interrogantes surjan respecto a él, dada su importancia para el desarrollo de la vida en la Tierra. Si consideramos que el fenómeno del cmT ha permanecido desvinculado de causas-efectos, no es de extrañar que civilizaciones como la china, la griega o alguna cultura europea surgida hace milenios llegaran a cuestionarse si el comportamiento observado en cierto tipo de rocas era originado por algún proceso o mecanismo surgido en la misma Tierra.

Responder estas dudas a partir de hechos empíricos puede resultar complicado, especialmente cuando lo único que se tiene son la observación y experiencia humanas, por lo que es fácil considerar, desde una visión actual, que ciertas causas-efectos relacionados con el fenómeno del cmT pasaran desapercibidos durante tanto tiempo.

En ese sentido, es también comprensible que algunas civilizaciones antiguas que existieron hace más de 3000 años consideraran que el comportamiento magnético de ciertas rocas se debiera a energías desconocidas cuya explicación muchas veces tuvo enfoques divinos o mitológicos. Esto pudo ocurrir en culturas como la china o la griega aunque también es posible que otras civilizaciones contemporáneas a estas hicieran éstas suposiciones.

En la actualidad, la mayoría de los seres humanos apenas conocen algo sobre el cmT, lo que lleva a pensar que este fenómeno suele pasar un tanto desapercibido en comparación con otros fenómenos que ocurren a diario y que forman parte del proceso evolutivo de la Tierra. Sin embargo, los humanos no somos ajenos a este fenómeno, ya que hay muchos indicios que manifiestan su existencia. Por tanto, este escrito intentará mostrar cómo, a partir de evidencias y estudios pasados, fue posible alcanzar el conocimiento necesario para postular aquellas primeras hipótesis sobre el origen y funcionamiento del cmT. Así mismo, al ser éste un fenómeno que se sigue estudiando en la actualidad, se tratarán de explicar los medios que permiten obtener la información necesaria. Además, se mencionarán algunos casos sobre cómo el cmT es indispensable para la vida y cómo éste sirve también de estudio en otras áreas científicas.

#### Anécdotas históricas

Antes de ver cómo fue posible llegar a evidenciar que el cmT siempre ha sido un fenómeno presente en la Tierra así como tratar de entender sus diferentes comportamientos y funciones, sería pertinente ante todo detenernos un momento y revisar cómo diferentes sucesos históricos fueron vitales para tal propósito. Un primer fenómeno sería el caso de las rocas magnetizadas, del que la mayor parte de las civilizaciones antiguas pudo observar. Por ejemplo, se cuenta que la civilización olmeca, una de las primeras culturas que habitó Mesoamérica hacia el año 1200 a.C., pudo haber desarrollado y antes que ninguna otra civilización del mundo un artefacto para orientarse formado a partir de rocas magnetizadas. Este hecho se basó en el descubrimiento de un artefacto que para su análisis fue llamado m-160 y que estaba conformado por rocas con minerales de hierro. La forma del artefacto hizo pensar que podría tratarse de una brújula. Para saber si esto era posible se realizó un experimento con una lámina de corcho que se puso sobre un recipiente con agua, mientras que encima se colocó el artefacto m-160. Girando sobre el agua el objeto se alineaba una y otra vez con respecto al norte magnético de la Tierra (Carlson, 1982). Este experimento ha permitido considerar que los olmecas fueron quizá la primera civilización conocida sobre el planeta que trabajó con rocas imantadas.

En Europa, la antigua civilización griega, conocida por sus grandes aportaciones en diferentes áreas de estudio -y que igualmente ha sido considerada como la cuna de la civilización occidental-, también realizó análisis de rocas conformadas por minerales de magnetita. Cabe mencionar que las magnetitas son el mineral más contribuyente al magnetismo de las rocas, las cuales están formadas por elementos de hierro y oxígeno ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

y cuyo nombre fue posiblemente acuñado debido a la localidad de Magnesia, en Grecia, de donde eran extraídas. Hacia el año 500 a.C., uno de los principales estudiosos del fenómeno magnético fue Tales de Mileto (624-546 a.C.), quien a partir de sus investigaciones sobre los magnetos o imanes que eran obtenidos de las magnetitas, observó cómo estos minerales tenían la propiedad de atraer ciertos objetos de carácter metálico. Además, pudo concluir que si frotaba estos metales de hierro con la magnetita adquirirían las propiedades magnéticas del mineral, es decir, el metal de hierro se magnetizaba. Tales de Mileto consideró que la causa era que poseían un alma, ya que en aquella época se consideraba que todo objeto que presentaba ciertos dinamismo o movimiento implicaba vida, alma o la intervención de un dios. En el caso de la civilización romana, el filósofo Lucrecio (98-54 a.C.), en su obra *'Sobre la naturaleza de las cosas'*, intenta separar el fenómeno de la imantación de los conceptos de almas o dioses.

Por su parte, el naturalista Plinio el Viejo (23-79 d.C.) se asombró de que una roca magnetizada atrajera los clavos de hierro de las sandalias de un pastor. En el caso del antiguo Egipto y de la India, las rocas magnetizadas también eran conocidas y usadas muchas veces como elementos de vestimenta desde hace más de 2000 años. Igualmente en el antiguo Cartago, ubicado en la actual Túnez, se ha mencionado que agujas magnetizadas fueron empleadas por el estadista Aníbal (247-183 a.C.) cuando invadió el imperio romano hacia el 203 a.C. Esto demuestra cómo en diferentes partes del planeta durante y después de la denominada edad de hierro (800-100 a.C.), varias civilizaciones prosperaron con el desarrollo y tratamiento de los metales de hierro y con el análisis y la observación de sus propiedades magnéticas.

Otra importante civilización que a través de los siglos no solo observó el comportamiento de las propiedades magnéticas a partir de metales de hierro o rocas magnetizadas, sino que también fabricó con ellos artefactos para diferentes fines y usos, fue la china. La referencia más antigua conocida sobre el análisis de rocas magnetizadas fue hacia el siglo IV a.C. en el *'Libro del jefe del valle de los demonios'*, donde se dice que la magnetita "hace que el hierro venga". Así mismo, en el libro llamado *'Louen-heng'*, escrito entre los años 20 y 100 d.C., se tiene el primer registro de cómo ciertos materiales quedaban magnetizados cuando rozaban o se frotaban con rocas de magnetita; en este caso, se describe cómo una aguja de metal quedaba magnetizada. Además, se habla de rocas de magnetitas que atraían objetos metálicos, lo que condujo a hacer las primeras consideraciones sobre su polaridad y la posible acción de la Tierra sobre la roca magnetizada. Hacia la Edad Media, que corresponde al periodo histórico entre los siglos V y XV d.C., las rocas magnetizadas comenzaron a ser empleadas para fines civiles y militares. Es durante la Dinastía Song (960-1279 d.C.), reconocida por contribuir con importantes avances tecnológicos en la historia de China, que surgieron las primeras descripciones de algunos artefactos y objetos hechos con rocas magnetizadas. A principios del siglo XI d.C., entre 1040 y 1044, se hacen menciones de artefactos magnéticos que eran utilizados como señalizadores del polo norte magnético usados para orientarse durante la noche.

Hacia el año 1086, en el libro *'Ensayo del tesoro de los sueños'*, el polímata Shen Kuo (1030-1095) describe la forma en que personas que se dedicaban a la geomancia o la adivinación lograban magnetizar una aguja que colgaba de una fibra de seda frotando su punta con un mineral de magnetita. Además, se comentaba que

algunas veces la aguja apuntaba hacia el norte y sur geográficos (Sivin, 1977, 1995). En el mismo libro, Shen Kuo hace mención de un artefacto magnético con forma de pez, «el pez que señala al sur» que en tal caso estaría señalando hacia el hemisferio sur de la Tierra (Figura 1a) comenta que se podía fabricar con una fina hoja de hierro cortada en forma de pez y calentada hasta que se pusiera al rojo vivo, posteriormente sería enfriada y sumergida en agua (Shen Kuo, 1088). Hacia el año 1119, el historiador marítimo Zhu Yu (960-1279), en su libro *'Pingzhou Ketan'* (Charlas de mesa de Pingzhou), describe el primer caso de una aguja magnetizada empleada para la navegación, siendo éste el primer instrumento de navegación relacionado con un artefacto de brújula antigua (Wu y Wu, 2021). Otro historiador importante de la dinastía Song fue Xu Jing, el cual nos comparte su pensar en el manuscrito *'Arrecife en el océano marino'*, donde menciona que un barco en altamar en días nublados solo puede pilotarse mediante una brújula flotante. Mientras tanto, de acuerdo con Joseph Needham (1900-1995), durante la dinastía Ming (1368-1644) también se desarrollaron brújulas secas o mojadras (Needham, 1974) que ya describían los puntos cardinales en rosas de vientos (Figura 1b). Se ha considerado que para el siglo XIV la brújula europea usada con marco de caja y aguja de pivote seco fue adoptada en China después de que piratas japoneses se apoderaran de ella en el siglo XVI. Estos avances permitieron tener una mayor noción del 'norte verdadero o geográfico' y diferenciarlo del 'norte magnético' (ver PNM y NG en la Figura 1c).

Navegantes árabes y europeos ya también hacían uso de agujas magnetizadas desde el siglo XI d.C., permitiendo por aquellos años emplear tres métodos de navegación: por orientación geográfica viajando cerca de la costa; por navegación astronómica en alta mar, donde seguían la posición de los astros del cielo para conocer la posición de la embarcación al medir la altura de las estrellas, y por navegación con el uso de la brújula. Caso distinto fue el de los vikingos, navegantes por naturaleza de quienes no se ha sabido que hicieran uso de algún tipo de compás magnético, sino más bien lo que se ha denominado como piedras solares. Alexander Neckham (1157-1217 d.C.) fue el primer europeo en contribuir de manera significativa en el desarrollo de la brújula de aguja magnética en su libro *'De Nominibus Ustensilium'*. Uno de los más importantes exponentes sobre el estudio del magnetismo hacia finales de la Edad

Media fue Peter Peregrinus, de quien poco se conoce. Peregrinus realizó varios estudios analizando el comportamiento de piedras magnetizadas y contribuyendo igualmente en el desarrollo y mejora de la brújula. Además, hacia 1269, propone la que sería su mayor aportación en la llamada *'Epístola de magnet'*: al analizar los comportamientos de una aguja con respecto a un imán diseñado de forma redonda, descubrió patrones en los que los círculos máximos trazados resultaban ser análogos con los meridianos de la Tierra (Figura 1d). A los puntos extremos en los que convergían tales círculos máximos los denominó 'polos', lo que sería análogo con los polos magnéticos (Figura 1c).

Durante las travesías por mares y océanos, navegantes chinos, árabes o europeos, observaron que la orientación de las agujas magnetizadas en las brújulas cambiaba cuando dichos viajeros se encontraban en diferentes puntos de la Tierra, un fenómeno que hasta ese entonces era desconocido. Cabe mencionar un hecho histórico: el caso particular de las cuatro expediciones que lideró Cristóbal Colón (1451-1506) entre la Península Ibérica y las Indias Occidentales, que era el nombre que antiguamente se daba al continente americano, aunque en realidad su objetivo era el de llegar a las Indias Orientales. En estos viajes Colón logró descubrir de forma casual, y sin que él mismo lo supiese, la declinación magnética. Esto fue en una primera instancia al intentar encontrar una solución para uno de los problemas más importantes que los navegantes tuvieron que enfrentar en aquellos tiempos, que era determinar la longitud o el meridiano en su punto de ubicación, ya que la latitud podía ser calculada a partir de la ubicación en la estrella polar de la constelación de la Osa Menor.

Pero ¿a qué se refiere esto de la declinación magnética? Durante su primer viaje, Colón analizó el comportamiento de la estrella polar y sus guardas, éstas últimas llamadas así por la conformación de las estrellas llamadas beta y gamma de la constelación de la Osa Menor, así como el comportamiento de la aguja magnetizada de la brújula. Como es sabido, la aguja casi nunca señala el norte verdadero o geográfico sino al polo norte magnético (ver NG y PNM en Figura 1c). La diferencia entre ambos nortes (NG y PNM) es conocida como la declinación magnética, que en la Figura 1c se menciona como  $\phi$ .

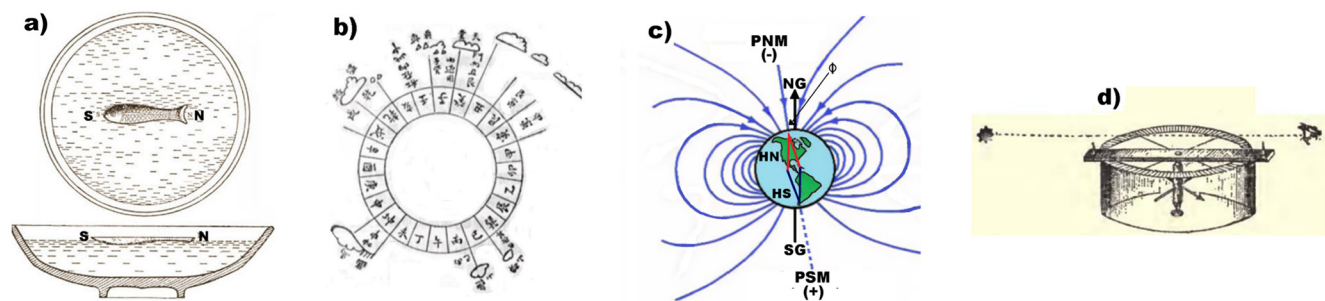


Figura 1 a) Ejemplo de un artefacto con forma de pez imantado, era colocado en un recipiente lleno de agua, señalando al norte magnético terrestre (tomado y modificado de Shen Kuo, 1088). b) Diagrama de una brújula, empleado para la navegación durante la dinastía Ming en China, entre los años 1368 y 1644 d.C. c) Esquema teórico del cmT como un gran imán, señalando el polo norte magnético actual (PNM), que es la dirección que señala la aguja imantada hacia el hemisferio norte (HN) y se ubica cerca del norte geográfico (NG). El polo sur magnético (PSM), que es un polo magnético inestable debido a que las líneas de fuerza del cmT cambian, no tiende a localizarse en un lugar específico del hemisferio sur (HS). Para este esquema, el PSM se representa con una línea azul y mantiene cierta distancia respecto del sur geográfico (SG). El valor  $\phi$  indica la declinación magnética-en este caso negativa, ya que tiende 'hacia el oeste', que es el ángulo entre el PNM y el NG ( $\sim 9.6^\circ$ ). Dado que los polos opuestos se atraen (norte y sur), sí el polo norte de una roca magnetizada como un imán se orienta a lo largo del eje norte-sur debido a la acción del PNM y PSM de la Tierra, entonces en realidad el PSM se encuentra cerca del NG. Por tanto, el planeta puede ser modelado como un imán gigante con el color rojo (+) apuntando hacia el PNM y el color azul (-) hacia el PSM. d) El imán pivotante de Peter Peregrinus utilizado para medir el acimut de las estrellas (tomado de Peregrinus, 2020).

Es evidente que Colón y sus marinos no sabían que esto fuera debido al PNM; simplemente veían que la aguja magnetizada no se dirigía exactamente hacia el norte geográfico. Hacia 1492, dado que el campo magnético de la Tierra (cmT) cambia con el tiempo, por aquel entonces la aguja de la brújula se desviaba en el Océano Atlántico un poco menos de lo que ocurre en la actualidad, pues ahora el PNM está más cerca del NG. Sin embargo, Colón observó esto al realizar mediciones siempre que el sol se ponía en algunos lugares como Palos, España, la aguja se desviaba al este (~4°), mientras que en las Islas Canarias la aguja se desviaba aún menos al este (~3°). En la medida en que Colón y sus marinos se alejaban de España y se adentraban en la inmensidad del Océano Atlántico, la aguja en las carabelas presentaba la tendencia de ir disminuyendo cada vez más al oeste. Esa declinación disminuyó hasta que la aguja marcó el norte magnético exacto, indicando que justo en ese momento estaban cruzando la llamada 'línea agónica o meridiano magnético cero'. Esto indicó que la aguja magnética se alineaba exactamente con el PNM y que por aquellos años se localizaba cerca de las Antillas, en el mar Caribe.

Cuando estuvieron en un punto al oeste de la línea agónica, la aguja magnética debió señalar al este del PNM (esto denominado como declinación positiva), mientras que en un punto al este de la línea agónica la aguja debió señalar al oeste del PNM (esto denominado como declinación negativa). Así, Colón acababa de descubrir no solo la declinación magnética, que de alguna manera ya era intuitiva más o menos por aquel tiempo, sino la variación de esa declinación magnética con la longitud ya que ellos estuvieron viajando del este al oeste y viceversa. Lo malo es que él nunca se dio cuenta de su descubrimiento, llegando a considerar que la responsable de tales comportamientos era la estrella polar.

Retornando de nuevo a Europa, pero ya durante el Renacimiento, hubo un auge de grandes científicos y exponentes respecto al tema del magnetismo. Por ejemplo, en torno al año 1546 d.C., Gerardus Mercator (1512-1594) concluyó que la magnetización de las rocas se debía a un campo magnético que estaba en la misma Tierra. Hacia el siglo XVII, el filósofo y naturalista William Gilbert (1544-1603) realizó los primeros experimentos sobre el magnetismo y los publicó en su libro '*De Magnete*', proporcionando las bases científicas sobre el magnetismo. En 1600, él consideró que las agujas imantadas indicaban que la Tierra entera se comporta como un enorme imán, cuyos polos magnéticos Norte y Sur no coincidían exactamente con los polos geográficos por donde pasa el eje de rotación de la Tierra (ver PNM y NG, Figura 1c).

En 1729, el naturalista inglés Stephen Gray (1666-1736) observó que la electricidad podía ser conducida a través de un cuerpo conductor. Otro sobresaliente investigador fue el físico danés Hans Christian Ørsted (1777-1851), el cual descubrió experimentalmente la relación entre la carga eléctrica y el magnetismo a partir de lo que ya había propuesto Alexander von Humboldt (1769-1859): que las cargas eléctricas generaban que las rocas se magnetizasen. Hacia 1820, Ørsted evidenció por primera vez esta relación, y consideró que, dado que en un material existen diminutas corrientes eléctricas debido al movimiento de los electrones en sus átomos, cada uno de estos electrones debía ser un imán microscópico. Si estos electrones están desorientados los efectos magnéticos pueden ser nulos, pero si están alineados el material se podría magnetizar.

Gilbert y Ørsted contribuyeron en gran medida al observar las variaciones de la declinación magnética, las cuales fueron registradas y documentadas en Londres. Para 1600 se había observado una declinación de 16° hacia el este, mientras que para 1800 fue de 24° hacia el oeste. Las mediciones continuaron, y en 1935 la declinación disminuyó a 12° hacia el oeste, mientras que en la actualidad es de aproximadamente unos 10° hacia el oeste. Por su parte, en 1834 Carl F. Gauss (1777-1855) propuso ciertas operaciones físicas y matemáticas en las que intentó expresar la distribución del flujo de un campo eléctrico sobre superficies cerradas. En 1853, Macedonio Melloni (1798-1854) analizó derrames de lavas del volcán Vesubio, observando que estas rocas presentaban una magnetización que seguía aproximadamente al PNM. Además de estos aportes, otros importantes experimentos y estudios surgieron en consecuencia, como el desarrollo de la corriente continua y el invento de la pila por parte de Alessandro Volta (1745-1827), así como la descripción del fenómeno electromagnético y sus expresiones matemáticas que propuso James C. Maxwell (1831-1879).

Un segundo fenómeno, igualmente importante y que también ha sido prueba evidente de la existencia del cmT, está relacionado con las llamadas auroras boreales (hacia el hemisferio norte de la Tierra) y australes (hacia el hemisferio sur de la Tierra). En Francia se han encontrado pinturas rupestres fechadas en aproximadamente 30 000 años que intentan representar dicho fenómeno. Civilizaciones que se han asentado cerca del Ártico desde hace milenios han considerado el fenómeno de las auroras boreales bajo diferentes tipos de interpretaciones, haciendo alusión a diferentes mitos o creencias. En la región de Laponia, actualmente Noruega, Suecia y Finlandia, el grupo étnico denominado como los Samis (aproximadamente desde el 7000 a.C.) ha contado en antiguas leyendas que las auroras boreales representaban los espíritus de los muertos. Sin embargo, la primera descripción documentada de este fenómeno fue quizá hecha por el explorador griego Piteas de Massalia (359-289 a.C.) durante su viaje por mar hacia el norte de Europa. Los relatos de Piteas fueron recopilados por otros autores en los siglos siguientes a su muerte, ya que sus relatos originales se perdieron.

El filósofo griego Aristóteles (384-322 a.C.), que también hace mención de tal fenómeno, considera que las auroras se originaban debido a vapores que emanaban de la superficie de la Tierra, considerando que se debía al calentamiento generado por el sol. En China existe documentación de hace más de 2000 años en la que durante aproximadamente 40 años se describe tal fenómeno. El filósofo romano Séneca (4 a.C.-65 d.C.) hace mención de las auroras en su libro '*Naturales Quaestiones*' (*Cuestiones naturales*) en el que describe su forma y tipo de color, aunque también se ha llegado a considerar que tal descripción fue relacionada con otro tipo de fenómeno. Antiguamente se creía que las auroras no se daban en latitudes bajas, pero ahora sabemos que esto no es cierto.

Fue Galileo Galilei (1564-1642 d.C.) quien en realidad dio el nombre a este fenómeno, considerando el nombre de aurora en honor a la diosa romana del amanecer y boreal en honor a Bóreas, el dios del viento del norte. Otros hechos históricos descritos que también pudieran relacionarse con el fenómeno de las auroras han sido aquellos narrados en algunos pasajes de la Biblia. Por ejemplo, el profeta Ezequiel (593-571 a.C.) hace una particular mención sobre un fenómeno que ha sido considerado como una aurora ('un viento huracanado venía del norte, una gran nube con fuego fulgurante y un resplandor a su alrededor, y en su centro, algo como metal



refulgente en medio del fuego’, Ezequiel, 1:4). Cabe la posibilidad de que Ezequiel intentara analogar este fenómeno con una visión divina, lo cual siempre será difícil de saber. Este fenómeno también ha sido considerado para otro tipo de circunstancias. Por ejemplo, hacia 1917, la visión mística de tres pastores en Fátima, Portugal, les hacía mención de un aviso divino relacionado con el inicio de la Segunda Guerra Mundial, el cual ocurrió en el año de 1939. Este aviso divino fue posteriormente relacionado con una aurora boreal de gran dimensión, la cual se pudo apreciar en casi toda Europa, ya que alcanzó latitudes muy bajas.

Los sucesos históricos de estos fenómenos no son ajenos a lo que podemos observar en la actualidad; sin embargo, representan un ejemplo claro de un conocimiento progresivo, el cual ya para el siglo XIX comenzaba a vislumbrar indicios de que ciertas causas-efectos eran generados debido a un tipo de mecanismo desconocido (p. ej. la magnetización de rocas o el fenómeno de las auroras). ¿Pero estos sucesos evidenciaban el hecho de que la Tierra poseía un campo magnético con un funcionamiento tal y como se ha podido conocer en la actualidad? En aquellos tiempos al menos hasta antes del Renacimiento pudo ser más difícil de considerar. No obstante, tales experiencias fueron fundamentales para cimentar las bases del conocimiento de un fenómeno que ha requerido de milenios y siglos de observaciones y estudios.

### El magnetismo experimental

Hacia los siglos XVI, XVII y XVIII fue posible tener una mejor concepción acerca del magnetismo como una importante propiedad física de la materia, permitiendo caracterizar experimentalmente rocas o minerales. Igualmente fue posible observar que algunos de estos minerales eran más fácilmente magnetizados que otros, que podían presentar poca magnetización o ser desmagnetizados. No obstante, desde mediados del siglo XIX, el estudio experimental en la magnetización de rocas, principalmente del tipo volcánico, forjó las primeras teorías que darían un mejor concepto del cmT. Giuseppe Folgheraiter (1856-1913) logró recuperar los registros magnéticos del cmT en rocas volcánicas. Sus investigaciones quedaron reforzadas con la aportación de Paul L. Mercanton (1876-1963), cuyos análisis se usaron para estudios arqueológicos. Raymond Chevallier (1891-1965) se centró en el magnetismo de minerales en rocas volcánicas, intentando datar magnéticamente flujos volcánicos de edades inciertas. Por su parte, Bernard Brunhes (1867-1910) demostró que la magnetización adquirida por un material podía persistir en el tiempo sin ser rápidamente reemplazada por otra magnetización externa. En ese sentido, debido a su origen, las rocas están conformadas por diferentes tipos de minerales, lo que influye directamente en su capacidad para ser magnetizadas por un campo magnético externo. A este proceso se le conoce como susceptibilidad magnética, propiedad física que puede ser dividida en tres grupos minerales: diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos.

La Figura 2 muestra ejemplos del comportamiento de los minerales respecto a un campo magnético externo. Los minerales diamagnéticos, como pueden ser la pirrotina, la pirita o la calcopirita, presentan una susceptibilidad magnética negativa, es decir, su magnetización va en sentido opuesto al campo magnético externo o que quiere decir que son repelidos. Dado que el material está conformado por átomos y partículas subatómicas, sus momentos magnéticos (mostrados en forma de borregos) se comportarán de forma independiente, como si cada uno de ellos estuviera al azar cuando no existe un campo magnético externo, mientras que, si

aparece un campo magnético, estos momentos se alinearán en la misma dirección pero de forma opuesta a la orientación del campo magnético externo ( flecha roja del campo magnético, Figura 2a).

Con respecto a los minerales paramagnéticos, como pueden ser el olivino, el piroxeno, el granate o la biotita, ligeramente magnéticos, su susceptibilidad magnética es pequeña. En este caso, cuando no existe un campo magnético externo, los momentos tienden a estar al azar, como ocurre en el caso diamagnético. Sin embargo, cuando aparece un campo magnético, estos momentos tienden a seguir más o menos la dirección del campo magnético, generando que la magnetización no sea tan importante ni permanente, por lo que cuando el campo magnético desaparece los momentos magnéticos vuelven a comportarse al azar (Figura 2b).

Los minerales ferromagnéticos, como el níquel, el cobalto, la awaruita o el hierro presentan una susceptibilidad positiva y alta, es decir, su magnetización ocurre en el mismo sentido que el campo magnético externo, por lo que los momentos magnéticos tienden a seguir al campo magnético. Cuando no existe el campo magnético, los momentos se presentan en un estado colectivo pero orientados. Cuando se aplica un campo magnético externo, los momentos magnéticos logran un estado de magnetización espontáneo con facilidad, el cual es consistente con la configuración ya ordenada previamente, por lo que los momentos y el campo magnético son paralelos en una misma dirección (Figura 2c). Los minerales ferromagnéticos pueden separarse en otros dos grupos: antiferromagnéticos y ferrimagnéticos.

En los minerales antiferromagnéticos, como puede ser la ilmeita, el ulvoespinela, la troilita, o la goetita, los momentos magnéticos tienden a presentar comportamientos similares y ser del mismo tamaño, es decir, presentan una misma magnitud. Estos no se encuentran al azar y están conformados por pares paralelos orientados en sentido opuesto -esto es principalmente porque su comportamiento es ‘antiparalelo’ (Figura 2d). La forma en que se distribuyen estos momentos genera que se mantengan estables cuando no aparece un campo magnético externo y cuando aparece un campo magnético tienden a alinearse con él. No obstante, estos momentos magnéticos podrían transformarse y presentar propiedades de tipo paramagnético, especialmente cuando el material está siendo sometido a ciertas temperaturas (Figura 2d). En el caso de los minerales ferrimagnéticos como son la magnetita, la magnesioferrita, el cobalto férrico, el cobre férrico, la jacobsita

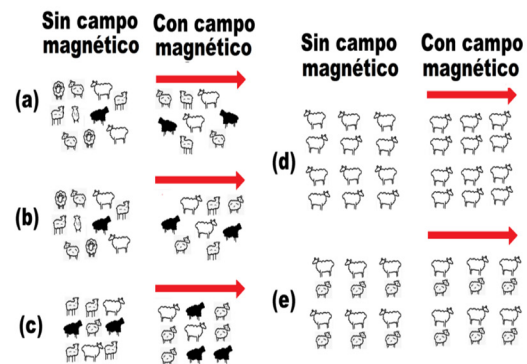


Figura 2 Ejemplo de susceptibilidad magnética debido a un campo magnético externo. Izquierda: comportamiento de los momentos magnéticos (borregos) en minerales a) diamagnéticos, b) paramagnéticos y c) ferromagnéticos. Derecha: dos diferentes ejemplos de minerales ferromagnéticos: d) antiferromagnéticos y e) ferrimagnéticos. Las flechas rojas señalan la dirección en la que actúa un campo magnético externo. Figura del autor.

o la pirroita, los momentos magnéticos se presentan orientados paralelamente pero en sentido opuesto y con tamaños diferentes. Esto genera que se mantengan pares de momentos de forma similar en ausencia de un campo magnético externo. Además, el campo magnético se ve potencializado en los pares de momentos magnéticos cuando aparece un campo magnético externo (Figura 2e).

Un mecanismo que ayuda a que los minerales cambien y adquieran ciertas propiedades magnéticas es la llamada termorremanencia. En tal mecanismo, la temperatura denominada como punto de Curie, que fue propuesta por el físico francés Pierre Curie (1859-1906), suele variar dependiendo del tipo de mineral. Por ejemplo, cuando un mineral ferromagnético es sometido a temperaturas por encima del punto de Curie tiende a cambiar a un estado paramagnético, algo que no sucedería con minerales antiferromagnéticos. En este estado, un campo magnético pequeño y externo es capaz de orientar los momentos magnéticos en la dirección del campo externo. Esta remanencia magnética es estable pero puede cambiar o desaparecer si se vuelve a alcanzar nuevamente la temperatura de Curie. La temperatura de Curie en grados Kelvin  $T_c(K)$  observada para minerales ferromagnéticos formados por cobalto es de  $T_c(K) > 1400$  K, mientras que para minerales de hierro es de  $T_c(K) > 1043$  K.

### Hacia una nueva concepción (1919)

El fortalecimiento en el análisis de los registros magnéticos recuperados en rocas extraídas de flujos de lava permitió, hacia finales del siglo XIX, tener un mejor entendimiento de que estos registros siempre indicaban al polo norte magnético en el momento de su magnetización. Esto llevó a una pregunta obligada: ¿qué mecanismo o fenómeno podría estar siendo la principal fuente de magnetización en las rocas? La respuesta no tardó en considerarse, ya que pocos siglos antes como diferentes trabajos como los de Peter Peregrinus, Gerardus Mercator o William Gilbert habían ya dado importantes fundamentos sobre la posible existencia de un campo magnético que se originaba en el interior del mismo planeta y que se comportaba como un gran imán. Para 1822, André-Marie Ampère (1775-1836) ya había propuesto que las corrientes de energía internas eran responsables del magnetismo que se genera en la Tierra. Además, hacia 1881, Goldstein (1881) fue el primero en publicar la idea de que el Sol interactúa con un campo magnético en la Tierra y que envía al espacio rayos eléctricos similares a los rayos catódicos, haciendo una misteriosa conexión entre las variaciones de la actividad solar y las fluctuaciones de fenómenos magnéticos y eléctricos en la Tierra, una relación directa que conectaba con el fenómeno de las auroras. Pronto surgiría una nueva forma de explicar tal fenómeno cmT.

Hacia finales del siglo XIX y principios del siglo XX, después de analizar un cuerpo giratorio similar a nuestro Sol convirtiéndose en un gran imán (Figura 3), el físico Inglés Joseph Larmor (1857-1942) propuso un modelo teórico con el que intentó explicar el comportamiento de este gran imán, al cual llamó 'el Dínamo'. Su simple idea de que el campo magnético es el resultado de la acción de un dínamo en un núcleo fluido y que es conductor de electricidad en la Tierra encontró muchas dificultades, lo que tiempo después llevó a diferentes tipos de propuestas alternativas. En esta nueva concepción de un modelo magnético, Larmor intentó idealizar de manera analítica y experimental los procesos y comportamientos que podían estar ocurriendo tanto en el interior como en el exterior de la Tierra; propuso, en primera instancia, ciertas consideraciones para que el cmT pudiera generarse, creando una importante

disciplina que hasta el día de hoy se estudia y perfecciona. En este caso, tuvo en cuenta que tal modelo del dínamo debía tener características bien establecidas, principalmente una conductividad central que fuera lo suficientemente alta como para garantizar la estabilidad del mismo. En ese sentido, si había una conductividad principalmente de tipo eléctrico y termal en el núcleo de la Tierra, ésta debía ser también de tipo metálico.

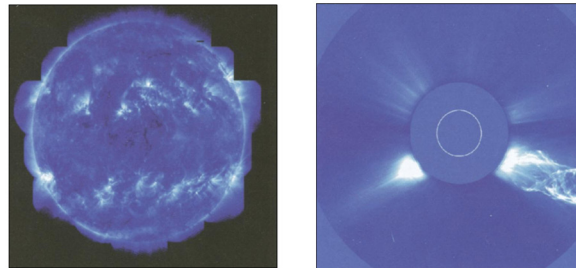


Figura 3. Ejemplo de radiografías del Sol registradas por el satélite SOHO de Japón, mostrando actividad del campo magnético solar. (Imagen tomada de Tobias, 2002).

Este último modelo fue respaldado por las aportaciones hechas de Emil Wiecher, Richard Olham y Jed Emil Wiechert que ya habían descubierto que la Tierra presentaba un núcleo sólido y consideraban la posible existencia de una parte líquida en el mismo núcleo, así como otro tipo de capas internas. Es así como la teoría del dínamo trajo los primeros análisis experimentales, en los que la magnetización de rocas y el fenómeno de las auroras fueron evidencias tangibles y observables de la existencia de un enorme campo magnético en el núcleo de la Tierra, el cual influía en todo el planeta. Así mismo, permitió explicar un funcionamiento en conjunto del planeta y del cmT.

La teoría del dínamo trata de explicar los procesos y mecanismos que permiten la generación de un campo magnético en una estrella o cuerpo celeste como la Tierra. Así, Larmor sugirió que un campo magnético interno se podría recuperar de forma análoga con su modelo de dínamo. Consideró que en el interior del planeta la interacción y movimiento de ciertos elementos y materiales producen las corrientes eléctricas necesarias para que se genere el campo magnético. Esta consideración se retomó hacia 1930, cuando se confirmó la existencia de una parte líquida en la zona más externa del mismo núcleo. Esto fue previamente observado en 1926 por el geofísico inglés Harold Jeffreys (1891-1989), considerando que el núcleo externo estaba compuesto de metal derretido, proporcionando así el medio conductor requerido para las consideraciones hechas por Larmor (Bullard, 1948).

Para fortalecer la teoría del dínamo fue necesario considerar un movimiento convectivo en el núcleo exterior, principalmente formado por elementos de hierro y níquel fundido. Esta explicación fue asumida, lo que llevó a considerar la generación del campo magnético a partir de una inducción electromagnética (Elsasser, 1946; Bullard, 1948). Posteriormente, Elsasser (1947) mostró que es posible el fortalecimiento de un gran campo magnético en el núcleo debido al movimiento de rotación que presenta la Tierra. Así, estos materiales metálicos en movimiento convectivo sufren el llamado efecto de Coriolis, el cual fortalece el campo magnético en el interior.

Cuando estos materiales en movimiento convectivo, también considerado como plasma conductor, se desplazan por un campo magnético ya existente aparecen corrientes eléctricas inducidas creando otro campo magnético. Cuando este campo inducido se

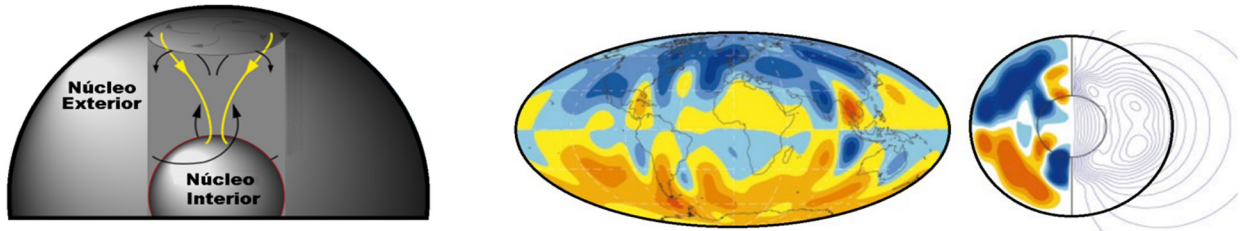


Figura 4. Izquierda, ejemplo de un tipo de modelo del geodínamo, en el que se genera el cmT desde el núcleo exterior y por ende el flujo del campo magnético (líneas amarillas) y sus velocidades (líneas negras). Modificado de Cao *et al.*, 2018). Derecha, simulación del campo magnético generado entre los límites del núcleo y el manto con proyecciones del campo magnético hacia afuera, rojo y hacia adentro, azul (Tomado de Roberts y Glatzmaier, 2000).

añade al campo preexistente se genera un campo magnético mayor que puede sostenerse a sí mismo. Este movimiento de fluidos cargados eléctricamente que se originan en el núcleo fluyen a lo largo de rutas conductivas a través del manto (Busse y Wicht, 1992).

Este proceso convectivo en el núcleo exterior es necesario para que el campo magnético sea constante y estable. Se ha considerado que tal proceso resulta de una combinación térmica y composicional (Buffet, 2000) en la que el manto juega un papel importante al controlar la velocidad con la que el calor sale desde el núcleo. A partir del uso de modelos computacionales, se ha considerado que las fuentes de calor pueden ser controladas por varias causas como la acción gravitacional que se genera debido a la compresión del núcleo, principalmente en la medida en que va creciendo (Buffet, 2000); el calor latente en el núcleo (Buffet, 2000) y los efectos de radiactividad generados por ciertos elementos (p. ej., potasio, uranio o torio; Sanders, 2007).

Estos procesos han sido considerados como una base importante para que el dínamo funcione. Sin embargo, a pesar de que nuevos trabajos y resultados se siguen dando a conocer desde comienzos del siglo XXI, los diferentes modelos computacionales del dínamo parecen variar; por ejemplo, si se considera que la superficie del núcleo presenta una temperatura constante, entonces es posible generar un campo magnético con ciertas características que se cree ocurren en la Tierra, pero si estos incorporan parámetros más realistas considerando variaciones de temperatura en la superficie del núcleo, se han obtenido aumentos significativos del flujo convectivo que producen un campo magnético más realista (Figura 4).

### Un experimento mental

Usar la imaginación para investigar la naturaleza de las cosas resulta apropiado cuando se intenta idealizar y/o explicar algún tipo de fenómeno, vinculando una secuencia de procesos que en la misma naturaleza surgen y conducen a tal fenómeno. Es así como algunos modelos propuestos posteriormente a aquel primero de Josept Larmor surgieron con la intención de reconocer esa secuencia de procesos que no solamente han permitido relacionar el funcionamiento del cmT con evidencias tangibles y observables (p. ej. la magnetización de rocas o la formación de auroras), sino que también han permitido tener un mejor entendimiento del proceso evolutivo del planeta mismo. ¿Esto quiere decir que si la Tierra no tuviera campo magnético no habría provocado la magnetización de minerales como la magnetita o el surgimiento de algún otro tipo de fenómeno?

Gracias al modelo del dínamo, en especial a aquellos denominados 'geodínamos', los cuales han sido mayormente usados en décadas recientes, es posible corroborar experimentalmente que el cmT es responsable de muchos de los fenómenos magnéticos observados

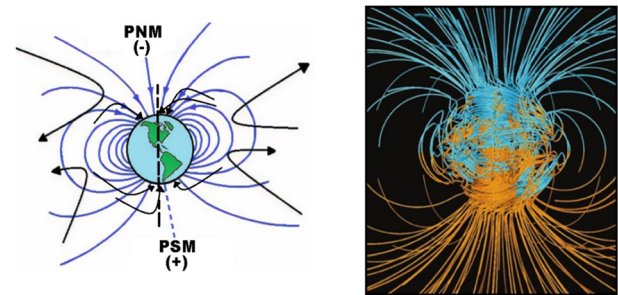


Figura 5 (izquierda). Ejemplo del cmT cuyo flujo magnético entra por el polo norte magnético (PNM) y sale por el polo sur magnético (PSM) cerca de los polos geográficos de la Tierra. Estos flujos magnéticos son representados por las flechas azules y están casi alineados con el eje de rotación terrestre: ver la línea negra a trazas. Las líneas negras representan partículas de energía proveniente del Sol que interactúan en la zona donde entra el cmT. Estas partículas solares se dirigen hacia los polos magnéticos produciendo las auroras boreales o australes (derecha). Ejemplo del cmT obtenido a partir de modelos computacionales del geodínamo (Imagen tomada de Glatzmaier y Robert, 1995).

y registrados en la Tierra sin que por ello se descarte la influencia del Sol sobre algunos de estos fenómenos terrestres. En general, los movimientos de rotación y traslación a los que está sujeta la Tierra impulsan fuertemente el flujo de esta energía magnética del cmT tal y como se ha mencionado, generando que este flujo magnético siga el eje rotativo (p. ej. líneas negras a trazas Figura 5). En el caso de las auroras que se generan cuando partículas cargadas eléctricamente y provenientes del Sol chocan contra la atmósfera y el cmT, son redirigidas hacia los polos magnéticos de la Tierra (flechas negras Figura 5).

En modelos más recientes del geodínamo se ha integrado la influencia del manto como pieza clave en el proceso convectivo del núcleo, el cual permite el origen y funcionamiento del cmT, ya que al ser el manto masivo y relativamente lento es capaz de controlar el enfriamiento que ocurre en el núcleo, regulando su flujo de calor a través del límite entre ambos. Este control es influenciado por otro proceso de vital importancia para el funcionamiento de la Tierra, el llamado 'proceso de convección del manto' (atención: no es igual este proceso de convección del manto que el proceso de convección que ocurre en el núcleo). El proceso convectivo del manto, que para este manuscrito solo se menciona de forma general, se genera debido al fraccionamiento y/o separación de materiales con diferentes densidades y condiciones térmicas con un funcionamiento cíclico en el mismo manto (p. ej. las flechas en color rojo que suben y bajan en la zona del manto, Figura 6). Pero ¿qué se logra con esta separación de materiales y por qué ocurre?

El principal mecanismo que genera este fraccionamiento de materiales es el enfriamiento de la Tierra, ya que desde que inició su formación, hace aproximadamente 4543 Ma (millones de años; Rudge *et al.*, 2010), la Tierra primitiva o también llamada "proto



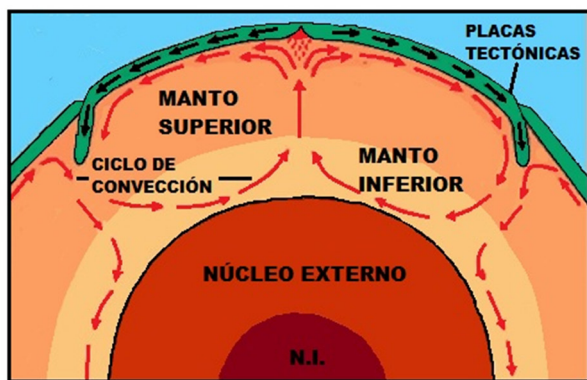


Figura 6 Movimiento en el interior de la Tierra a partir de la idealización del proceso de convección del manto, se observan corrientes convectivas (flechas en rojo) junto con el movimiento de las placas tectónicas en la parte superior (flechas en negro). N.I.: núcleo interno. (Modificado de Davies y Richards, 1992).

Tierra" se encontraba en un estado incandescente debido a la gran cantidad de impactos durante su proceso de acreción, el cual se ha considerado que pudo durado alrededor de 10 Ma, con base en la teoría cosmogónica de la nebulosa solar propuesta por Jacobsen en 2005 (Figura 7).

Esto produjo un incremento de calor a gran escala, haciendo que la Tierra primitiva se fundiera y que con el paso de los miles de millones de años se fuera enfriando progresivamente, dando forma a las diferentes capas internas que actualmente conocemos. Este proceso, que se da en el interior de la Tierra, ha separado los materiales y elementos más pesados y densos hacia el centro del planeta para conformar el actual núcleo, el cual en el pasado presentaba mayores dimensiones, mientras que los materiales menos densos y ligeros conforman el manto y la corteza actuales. Además, dado que también este proceso convectivo controla directamente el movimiento de las placas tectónicas (Figura 6), el ascenso de rocas conformadas por minerales magnéticos permitirá que estos se magneticen por la influencia del cmT cuando alcancen la superficie terrestre.

Por otro lado, los actuales modelos del geodinamo intentan explicar procesos que pudieron haber ocurrido en el pasado y que podrían respaldar las llamadas teorías cosmogónicas, tratando de explicar el origen y formación de la Tierra así como del sistema solar.

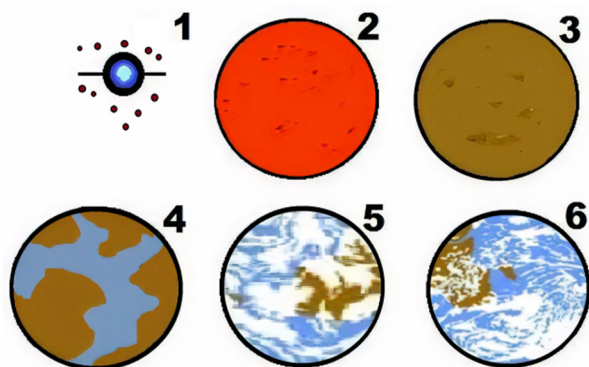


Figura 7. Evolución de la Tierra. (1) Formación y choque de planetesimales (pequeños cuerpos rocosos formados de gas y polvo) que comienzan a acrecionarse para formar la Tierra primitiva. (2) Tierra primitiva más estable e incandescente. (3) Tierra primitiva comienza a enfriarse, generando la primera corteza terrestre. (4) Formación de la atmósfera y los océanos. (5) Origen de los primeros grandes continentes y (6) la formación de la Tierra actual. Figura del autor.

### La historia de la Tierra marcada por el cmT

El surgimiento del paleomagnetismo (una disciplina que forma parte de la ciencia del geomagnetismo) ha permitido observar que el comportamiento del cmT ha cambiado a través del tiempo. Se ha observado experimentalmente que las direcciones magnéticas pasadas del cmT pueden abarcar de cientos de miles a millones de años y quedan registradas en las rocas. Un ejemplo de esta magnetización ocurre cuando se da el fenómeno del vulcanismo, en el que el material volcánico conformado por minerales magnéticos es expulsado de un volcán formando un río de lava. Este material volcánico entra en contacto con el ambiente y se enfría, registrando la dirección y declinación del cmT de ese momento. Sin embargo, ¿qué pasaría si tales direcciones del cmT cambiaran nuevamente, por ejemplo que el PNM se dirigiera hacia el Ecuador? (Figura 5). Primero que nada, la roca magnetizada conservaría la dirección del cmT antiguo, pero si se quisiera actualizar la orientación de su magnetización con un nuevo comportamiento del cmT, entonces tal remanente de magnetización requeriría que las rocas sufrieran un nuevo calentamiento hasta el punto de Curie.

Tales cambios en las orientaciones del cmT para diferentes ubicaciones y tiempos permiten restringir la edad de los materiales en una escala de tiempo de polaridades magnéticas (Figuras 8a, b, y c). Con este tipo de análisis se pudo considerar hacia la década de los años 80 del siglo XX que la Tierra ya manifestaba tener un campo magnético desde hace al menos 3.5 Ma (McElhinny y Senanayake, 1980). En estudios posteriores llevados a cabo en las últimas décadas del siglo XXI se observó que tal edad del cmT en la Tierra era mayor, considerando edades desde al menos los 3600 Ma (Buffet, 2003) y de entre los 3000 y los 3700 Ma (Dobson, 2016). Si estas edades se comparan con la edad de la Tierra (~4560 Ma, Helled *et al.*, 2020) es posible confirmar que ya poseía un campo magnético casi desde sus primeros instantes de formación.

Por otro lado, estos cambios magnéticos en las rocas también han permitido ver dos situaciones importantes: 1) que el cmT no ha presentado el mismo comportamiento a lo largo de la historia de la Tierra, y 2) que si el cmT ha cambiado, también el interior de la Tierra se ha modificado. ¿Qué podría generar estos cambios de orientación o de polaridad magnética (p. ej. de positivo a negativo o viceversa) en el cmT? Se ha considerado que variaciones en la composición química y térmica de los materiales en el límite manto-núcleo podría generar anomalías de temperatura y densidad haciendo que estos materiales permanezcan en el manto o desciendan hacia el núcleo, influyendo directamente en el flujo de calor entre ambas capas y alterando la capacidad del flujo de las corrientes eléctricas (Bloxham y Gubbins, 1987; Lay *et al.*, 1998). Así mismo, se ha considerado que cambios de la velocidad de rotación y/o traslación de la Tierra han generado que las velocidades relativas entre cuerpos sólidos y líquidos en el interior del planeta cambien temporalmente, afectando también el flujo de las corrientes eléctricas que circulan entre el núcleo y el manto (Olson y Glatzmaier, 1995).

Efectos de este tipo comenzaron a ser observados hace más de un siglo, ya que hacia 1906 el geofísico japonés Motonori Matuyama (1884-1958) sugirió que magnetizaciones inversas observadas en rocas antiguas se habrían generado cuando el cmT se comportaba de forma inversa -que sería como si en aquella época una brújula señalara al polo sur magnético en lugar del norte magnético-. Tal circunstancia también fue corroborada al observar que estos cambios de orientación magnética no ocurrían en rocas



con propiedades antiferromagnéticas (Figura 2d) sino con diferentes composiciones mineralógicas para una misma ubicación y tiempo de registro. Esto fortaleció aún más la idea de que las polaridades del cmT se han invertido o cambiado en el pasado. Por ello se han estudiado ampliamente diferentes periodos de inversión. Por ejemplo, el periodo denominado Bruhnes-Matuyama (Clement, 2004), que ha sido considerado como la última inversión magnética que ha tenido el cmT, el cual se considera que comenzó hace unos 700 000 años; mientras que el periodo denominado como Gauss-Matuyama, ocurrió hace unos 2.5 Ma (Clague, 2006). Estos cambios en la polaridad del cmT no se presentan en un determinado periodo de tiempo, sino que parecen estar relacionados con particulares mecanismos en el interior de la Tierra.

Tomando en cuenta lo anterior, se puede decir que la orientación de magnetización de las rocas va a depender de la edad misma de la roca. Sin embargo, ¿qué pasa cuando se analizan rocas para periodos de tiempo similares pero sus orientaciones magnéticas varían debido a que se localizaron en diferentes continentes? Esta pregunta pone en evidencia que hay algo más que solo cambios del PNM o variaciones de la polaridad del cmT, especialmente cuando se toman muestras de roca en diferentes lugares del planeta. Por ejemplo, al tratar de correlacionar polos magnéticos para muestras de roca recuperadas en diferentes continentes se ha observado que no suelen coincidir entre sí (Figura 8d). Esta situación solo puede tener una explicación, y es que los polos magnéticos migran, lo cual ha permitido entender y al mismo tiempo corroborar la llamada ‘Teoría de la deriva continental’ propuesta en 1915 por Alfred Wegener (1880-1930) (Wegener, 1915). En esta teoría, los continentes migran y se desplazan siguiendo los llamados límites de placas; el físico británico Keith Runcort (1922-1995) fue uno de sus principales exponentes y defensores.

Gracias a que la remanencia magnética ha permanecido grabada en rocas antiguas localizadas en diferentes partes del planeta, y de que tal remanencia no concuerda con la actual orientación del cmT, es como ha sido posible concluir que los continentes se desplazan siguiendo el mismo patrón evolutivo de la Tierra.

En la Figura 8d se muestra un ejemplo en el que se intenta reconstruir el supercontinente antiguo llamado ‘Pangea’, en el cual los paleopolos (polos magnéticos antiguos) obtenidos a partir de muestras de roca magnetizadas (círculos negros) se emplean para demarcar los posibles desplazamientos y rotaciones de bloques de roca o continente. En este caso, se usan trazados circulares en color rojo para el continente ‘Laurasia’ y en azul para el continente ‘Gondwana’. Los diferentes puntos de color negro intentan mostrar la migración de los paleopolos a partir de las orientaciones magnéticas recuperadas en rocas de aquella época.

### Un posible futuro del cmT

Volviendo al título de este escrito, no hay duda de que el cmT es un fenómeno que ha existido desde hace miles de millones de años, inclusive se puede pensar que desde los primeros instantes de la formación del planeta. La comprensión de este fenómeno ha requerido de siglos de observaciones y estudios, permitiendo ver que el cmT es una consecuencia directa del mismo funcionamiento y proceso evolutivo de nuestro planeta. La semilla sembrada hacia 1919 y la aportación de la teoría del dínamo y sus bases experimentales ayudaron a poner los cimientos de un fenómeno que se integra con el funcionamiento mismo de la Tierra, el cual sigue siendo objeto de estudio. En la actualidad, nuevas herramientas experimentales permiten estudiar el cmT a partir de recreaciones computacionales, y preguntarnos si el cmT continuará existiendo en el futuro. Responder esto no debería resultar difícil si intentáramos recurrir al pasado para constatar su existencia; no obstante, evidencias externas a la Tierra muestran que los campos magnéticos en otros planetas del sistema solar son diferentes. Por ejemplo, en el caso de los planetas Mercurio, Venus o Marte, tienen un origen similar y estructuras rocosas parecidas a las de la Tierra, por lo que presentan campos magnéticos similares al cmT pero menos intensos.

Particularmente en el caso de Marte, su campo magnético actual ha mostrado ser mucho más débil que el del cmT, el cual podría estar siendo generado únicamente por remanentes magnéticos que se presentan en rocas magnetizadas ubicadas sobre la superficie del planeta. Se ha considerado que este decaimiento del campo magnético de Marte pudo deberse a que sus capas internas dejaron de generar el suficiente flujo de calor, afectando sus propios procesos convectivos, similares a los procesos que ocurren en la Tierra y teniendo como consecuencia que el viento solar agote su atmósfera y afecte su débil e inestable campo magnético. Además, otro problema que también afecta la magnetización del planeta rojo es la gran cantidad de impactos por meteoritos. Esto muestra que el funcionamiento del actual cmT tal y como lo conocemos podría verse afectado en un futuro de forma similar al de Marte en millones de años, ya que es evidente que el proceso de enfriamiento gradual y continuo que ocurre en el interior de la Tierra (p. ej. el observado en los sistemas volcánicos y/o terremotos) generará cambios en las dimensiones de las capas internas, posiblemente con un núcleo más angosto y un manto-corteza con un mayor espesor.

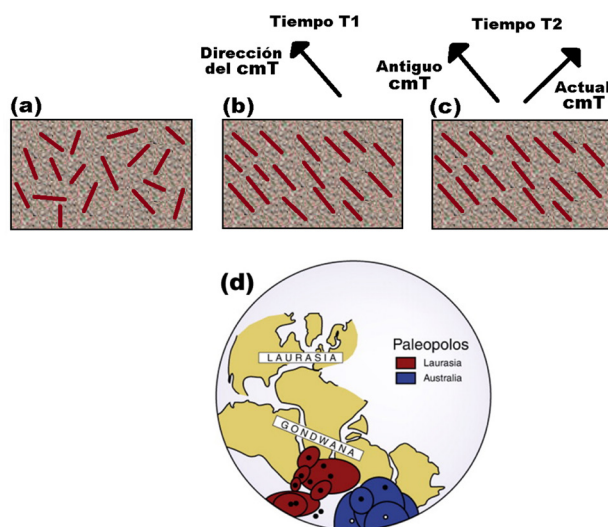


Figura 8. Ejemplo de cambios en la magnetización de rocas (arriba): a) Momentos magnéticos al azar (líneas en color rojo), debido a que no existe un campo magnético externo. b) Para un tiempo determinado T1 (antiguo), aparece un campo magnético y los momentos magnéticos se alinean. c) Momentos magnéticos registrados en un tiempo T2 (actual) no coinciden con la actual orientación del cmT (abajo). d) Reconstrucción del antiguo supercontinente llamado ‘Pangea’ a partir del análisis de muestras con edades de periodos geológicos del Paleozoico y Mesozoico. (Imagen tomada de Domeier *et al.*, 2012).

## AGRADECIMIENTOS

A los tres revisores de este manuscrito y a los editores de la revista Enseñanza y Comunicación de las Geociencias por sus comentarios y sugerencias.

## REFERENCIAS

- Bloxxham, J., Gubbins, D., 1987. Thermal core–mantle interactions. *Nature*, 325(6104), 511-513.
- Buffert, B. A., 2000. Earth's core and the geodynamo. *Science*, 288(5473), 2007-2012.
- Buffett, B. A., 2003. The thermal state of Earth's core. *Science*, 299(5613), 1675-1677.
- Bullard, E. C., 1949. The magnetic field within the Earth. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 197(1051), 433-453.
- Busse, F. H., Wicht, J., 1992. A simple dynamo caused by conductivity variations. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 64(1-4), 135-144.
- Cao, H., Yadav, R. K., Aurnou, J. M., 2018. Geomagnetic polar minima do not arise from steady meridional circulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(44), 11186-11191.
- Carlson, J. B., 1982. Brújula de piedra-imán, ¿primicia china u olmeca?
- Clague, J., 2006. Open letter by INQUA, executive committee. *Quaternary Perspectives*, 16(1), 158-159.
- Clement, B. M., 2004. Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude. *Nature*, 428(6983), 637-640.
- Davies, G. F., Richards, M. A., 1992. Mantle convection. *The Journal of Geology*, 100(2), 151-206.
- Dobson, D., 2016. Earth's core problem. *Nature*, 534(7605), 45-45.
- Domeier, M., Van der Voo, R., Torsvik, T. H., 2012. Paleomagnetism and Pangea: the road to reconciliation. *Tectonophysics*, 514, 14-43.
- Elsasser, W. M., 1946. Induction effects in terrestrial magnetism part I. *Theory. Physical Review*, 69(3-4), 106.
- Elsasser, W. M. 1947. Induction effects in terrestrial magnetism. Part III. *Electric modes. Physical Review*, 72(9), 821.
- Glatzmaier, G. A., Roberts, P. H., 1995. A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. *Nature*, 377(6546), 203-209.
- Golstein, 1881. Über die Entladung der Electricität in verdünnten Gasen,“ in *Wiedemanns Annalen*, vol. XII, p. 266.
- Helled, R., Nettelmann, N., Guillot, T., 2020. Uranus and Neptune: origin, evolution and internal structure. *Space Science Reviews*, 216(3), 1-26.
- Jacobsen, S. B., 2005. The Hf-W isotopic system and the origin of the Earth and Moon. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, 531-570.
- Lay, T., Williams, Q., Garnero, E. J., 1998. The core–mantle boundary layer and deep Earth dynamics. *Nature*, 392(6675), 461-468.
- McElhinny, M. W., Senanayake, W. E., 1980. Paleomagnetic evidence for the existence of the geomagnetic field 3.5 Ga ago. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B7), 3523-3528.
- Needham, J., 1974. *Science and civilisation in China* (Vol. 5). Cambridge University Press.
- Olson, P., Glatzmaier, G. A., 1995. Magnetoconvection in a rotating spherical shell: structure of flow in the outer core. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 92(1-2), 109-118.
- Peregrinus, P., 2020. The letter of petrus peregrinus on the magnet, ad 1269 (Vol. 1). *Library of Alexandria*.
- Roberts, P. H., Glatzmaier, G. A., 2000. Geodynamo theory and simulations. *Reviews of modern physics*, 72(4), 1081.
- Rudge, J. F., Kleine, T., Bourdon, B., 2010. Broad bounds on Earth's accretion and core formation constrained by geochemical models. *Nature Geoscience*, 3(6), 439-443.
- Sanders, R., 2007. Radioactive potassium may be major heat source in Earth's core. *UC Berkeley News. Diakses*, 02-28.
- Shen Kuo, 1088. *Ensayos del Arroyo de los Sueños*“. (Mèng Xī Bǐ Tán).
- Sivin, N., 1995. State, cosmos, and body in the last three centuries BC. *Harvard Journal of Asiatic Studies*, 55(1), 5-37.
- Sivin, N., 1977. Shen Kua: A Preliminary Assessment of His Scientific Thought and Achievements. *Sung Studies Newsletter*, (13), 31-56.
- Tobias, S. M., 2002. The solar dynamo. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1801), 2741-2756.
- Wegener, A., 1915. *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane: Vieweg & Sohr, Braunschweig*; 2nd ed., 1920; 3rd ed., 1922, translated into English in 1924; 4th ed., 1924, revised by A. Wegener and translated into English in 1929.
- Wu, C., Wu, C., 2021. A Comparative Study of the Astronomical Navigation Between Ancient China and Pacific Austronesian. *The Prehistoric Maritime Frontier of Southeast China: Indigenous Bai Yue and Their Oceanic Dispersal*, 187-206.

Manuscrito recibido: 27 de marzo de 2024

Manuscrito corregido: 13 de septiembre de 2024

Manuscrito aceptado: 3 de octubre de 2024