

LA IMPORTANCIA DE UNA FUERZA INVISIBLE: EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Manuel Catalán Morollón

Una de las facetas que contribuye a dotar a la Física de un aspecto mágico consiste en abordar el estudio de determinados tipos de fuerzas capaces de ejercer su efecto sin precisar un contacto físico entre los cuerpos en cuestión. Estas fuerzas, también denominadas “campos de fuerzas”, son principalmente tres: el campo gravitatorio, el eléctrico y los campos magnéticos.

Las diferencias existentes entre ellas quedan patentes desde el principio. Por lo pronto, el orden de intensidad marca la primera. Las fuerzas eléctricas son mucho más intensas que las gravitacionales, concretamente del orden del billón de billón de veces. Por otro lado, el magnetismo marca la siguiente diferencia. No es posible aislar lo que se denomina “monopolo magnético”, hablando, por tanto, de “dipolo”. En otras palabras, es imposible aislar un polo norte de un polo sur magnético.

También podríamos recordar que, así como las fuerzas gravitatorias siempre serán atractivas, tanto las eléctricas como las magnéticas podrán ser repulsivas o atractivas, según enfrentemos cargas eléctricas o polos magnéticos de distinto o del mismo signo. En cualquier caso es complicado expresar lo que entendemos por campos magnéticos. Quizá podríamos definirlo como un fenómeno físico invisible, capaz de producir fuerzas atractivas o repulsivas, presente en ciertas sustancias (generalmente llamadas “imanes”), pero

que puede ser también generado mediante corrientes eléctricas. Estas fuerzas son percibidas en las cercanías de la fuente originadora, aunque, en cualquier caso, el concepto de cercanía es algo relativo y dependerá de la mayor o menor intensidad del imán o de la corriente, disminuyendo ésta con el cubo de la distancia.

Propiedades magnéticas de la materia

Sabemos que existen materiales capaces de generar campos magnéticos al ser introducidos en el seno de un ambiente magnético. Dependiendo de la intensidad con que lo modifique y de si se opone al campo magnético inductor, se acostumbra a hablar de cuerpos paramagnéticos y diamagnéticos. Adicionalmente existen otros materiales capaces de generar una respuesta magnética sin precisar de un campo externo, introduciendo una

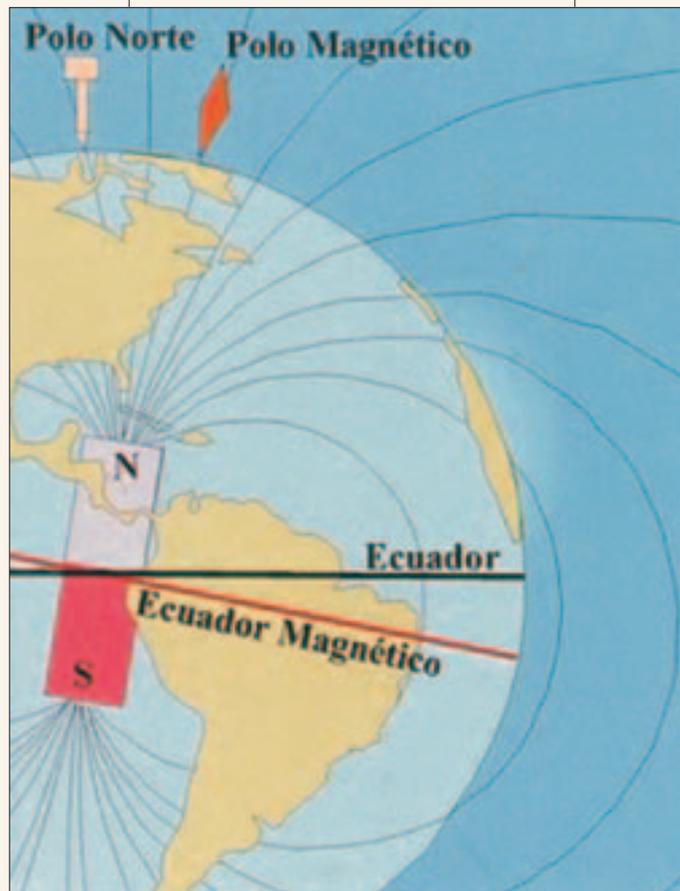
nueva clasificación, sumamente importante para la Geofísica, como son los materiales ferromagnéticos.

¿Dónde se origina este tipo de fuerzas? La respuesta la encontramos para la primera de las clasificaciones (paramagnéticas y diamagnéticas) en la estructura atómica de la materia. La existencia de electrones permiten asociarles un momento magnético.

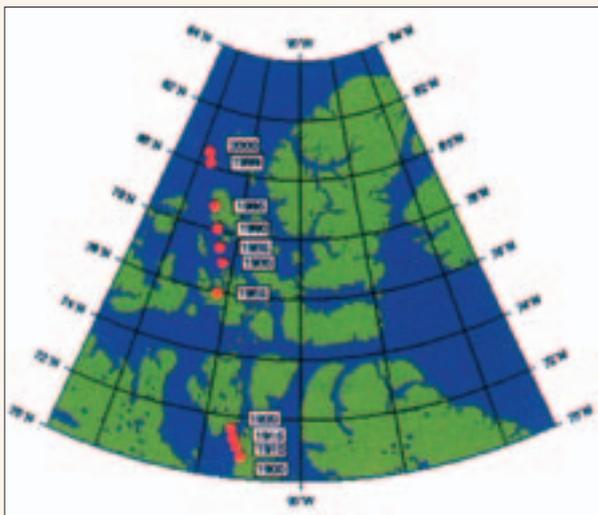
En el caso de los materiales ferromagnéticos, deberíamos profundizar un poco más, utilizando para su comprensión técnicas basadas en la mecánica cuántica.

Un aspecto que surge a continuación es analizar si únicamente la materia inerte es sensible a este tipo de fuerzas, o si, por el contrario, los seres vivos lo son también. Conocido es el caso de las palomas mensajeras y su asombrosa habilidad para orientarse en el espacio; también el caso

de las ballenas, de los delfines y de determinados tipos de tortugas... En todos éstos se ha podido constatar la existencia de núcleos de magnetita, desarrollados de forma natural en sus cerebros o estómagos. Asimismo se detecta la disminución de esta capacidad de orientación al encontrarse en presencia de un campo magnético perturbador. En definitiva, existen evi-



1. El efecto del campo magnético terrestre es modelizable matemáticamente mediante un gran imán situado en el interior de nuestro planeta, ligeramente inclinado respecto al eje de rotación y separado unos cientos de kilómetros de su centro.



2. Desplazamiento del polo norte magnético desde 1900 hasta nuestros días. Puede apreciarse la deriva al noroeste.

dencias de que determinados animales son sensibles al campo magnético y lo utilizan como fuente de información.

El campo magnético terrestre

En todos estos casos surge el concepto de campo magnético terrestre (CMT). La Tierra posee un campo magnético propio, sus líneas de fuerza parten de latitudes altas extendiéndose por el espacio exterior, conformando lo que se conoce como magnetosfera. Pero ¿cómo apareció? ¿Cuál es la causa que lo genera y mantiene?

La primera pregunta, hoy por hoy, no podemos contestarla. Sencillamente, no se sabe. Sin embargo, sobre la segunda sí podemos aportar algo de luz. Bajo la corteza terrestre nuestro planeta posee diversas capas: la primera de ellas, denominada manto, sirve de sustento directo de los continentes y fondos oceánicos sobre los que se desarrolla la vida. Esta región, que se adentra hasta 2.800 km en el interior de nuestro planeta, se encuentra limitada inferiormente por el núcleo.

El núcleo no es una región homogénea en cuanto a su estado físico. Su parte externa se encuentra en estado viscoso y está compuesta por átomos de hierro y níquel ionizados, debido a las altas temperaturas (probablemente superiores a los 3.000 °C).

Si a la presencia de estos iones metálicos le añadimos dos hechos: la rotación de nuestro planeta y la exis-

tencia de movimientos convectivos en su interior (consecuencia de gradientes de temperatura radiales) podríamos justificar la existencia de un campo magnético automantenido en tanto continúen las razones antes citadas que lo permiten: rotación y gradientes radiales de temperatura. Por todo lo anterior debemos descartar la presencia de campos magnéticos en planetas o satélites, como la Luna, que carezcan de un núcleo semifluido.

Tradicionalmente se acepta como punto de partida el siglo VIII a.C. en cuanto a conocimiento consciente de la existencia de materiales que presentan propiedades magnéticas. Así lo muestra el testimonio de vecinos, de los que hoy es una provincia turca situada al oeste de Anatolia, conocida durante la ocupación romana como

Magnesia, cuando detectaron unas piedras extrañas capaces de atraer el hierro.

El invento de la brújula es datado por algunos autores en China durante el periodo de la dinastía *Tang* (300 a.C.) aunque existen referencias que apuntarían a que este descubrimiento podría ser anterior. Su aplicación náutica, al menos en Europa, fue posterior, siendo utilizado por los navegantes, entre ellos **Colón**, a lo largo de sus navegaciones oceánicas. Sin embargo, realmente no se sabía explicar qué era lo que le proporcionaba a la brújula esa rigidez espacial, que le permitía apuntar hacia una estrella, en torno a la cual parecía girar eternamente nuestro planeta. Se especulaba con la posibilidad de algún tipo de fuerza que emanara de este cuerpo celeste. Tal era la confusión que **Colón** en sus viajes procuraba situar la bitácora alejada de la cocina para evitar la perturbación que los humores acres de los ajos pudieran introducir en su comportamiento.

Hubo que esperar al siglo XVII cuando **William Gilbert**, físico de la Corte de la Reina **Isabel I** de Inglaterra, publica la obra *De Magnete*. En ella, se habla por primera vez de la existencia de un campo magnético te-



3. La obtención de anomalías magnéticas proporciona una información esencial en determinados entornos permitiéndonos acceder al lejano sustrato rocoso.

restre, considerando que nuestro planeta se comporta como si contuviera un enorme imán en su interior.

Tendríamos que dejar pasar casi doscientos años hasta que los experimentos, principalmente del danés **Hans Christian Oersted** y del inglés **Michael Faraday**, pusieran de manifiesto la íntima conexión existente entre los campos magnéticos y eléctricos. Finalmente. La aportación crucial del científico inglés **James Clerk Maxwell** consigue darles a estos fenómenos una expresión matemática mediante cuatro ecuaciones diferenciales, poseedoras de una gran sencillez y simetría. El curso de la Ciencia definitivamente cambia desde ese momento, quedando obsoleta la distinción entre ambas expresiones físicas, magnetismo y electricidad. A partir de entonces hablaremos de campos electromagnéticos.

Sin embargo, desde el punto de vista del CMT, la gran referencia, o al menos la otra gran referencia, se la debemos al alemán **Carl Friedrich Gauss**. Este científico crea en Göttingen el primer observatorio geomagnético de la historia (1838). En 1839 consigue proporcionar, aproximándose con un grado de precisión que aún hoy nos dejaría asombrados, el campo magnético terrestre a la imagen virtual de un imán enorme situado a un centenar de kilómetros del centro de nuestro planeta, e inclinado unos 11° respecto a su eje de rotación. Utilizó para ello las observaciones proporcionadas por otros científicos, a las que les aplica formalismos matemáticos, como el de armónicos esféricos o el de separación de variables, creados por él mismo. Esta imagen (aún hoy utilizada) no es real, pero es útil, pues consigue de esta forma prever el valor que adoptará el campo en un determinado lugar, y nos lleva de lleno a un concepto fundamental en Geofísica como es el de anomalía magnética.

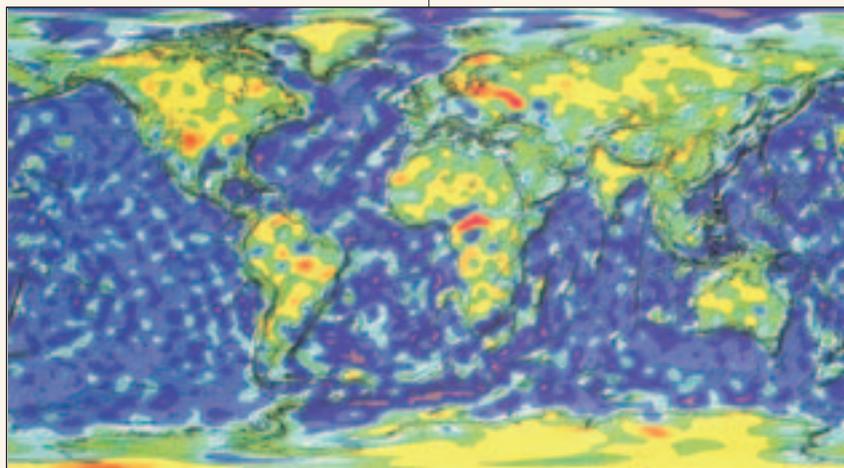
La creación de observatorios magnéticos se sucede con rapidez a partir de aquel momento y constituye la principal fuente de información y seguimiento de las vicisitudes que iría experimentando el campo geo-

magnético. Tanto en su variación de intensidad como en la posición de los polos magnéticos, siendo así hasta la llegada de los primeros satélites artificiales y entre éstos, los preparados para la medida del campo magnético de nuestro planeta.

Prácticamente desde el lanzamiento de los *Sputnik* –primeros satélites artificiales– pudo comprobarse que la forma y dimensiones del CMT variable sensiblemente con respecto al que generaría un imán próximo al centro de nuestro planeta. Esta forma

ográfico, mientras que el polo sur magnético se encontraba a unas 1.000 millas del polo sur geográfico, concretamente en el Mar de Ross (Antártida). A lo largo de la pasada centuria se ha desplazado a un ritmo aproximado de unos 10 km por año, en dirección nornoroeste (NNW), encontrándose en estos momentos cerca de la isla de Bathurst, en el noroeste de Canadá, a mitad de camino entre Groenlandia y Alaska.

Este dinamismo no sólo es detectado a partir de la variación de su po-



4. Mapa de anomalías magnéticas obtenidas desde satélites artificiales (*Magsat*, *OGO-2*, *OGO-4* y *OGO-6*). Llamen la atención principalmente dos, la de Bangui (República Centroafricana) y la Kursk (Rusia). El origen de ambas es controvertido. Algunas opiniones apuntan a que fueron producidas por el impacto de sendos meteoritos hace varios miles de millones de años, cuando la Tierra aún era joven. (Cortesía del Dr. **M. Purucker**, Goddard Space Flight Center, EE.UU.)

veía reducidas sus dimensiones (hasta unos radios terrestres) en el hemisferio que hace frente al Sol, consecuencia de la presión generada por el viento solar, extendiéndose hasta 60 radios terrestres en el hemisferio opuesto.

Los polos magnéticos

La posición de los polos magnéticos no coincide con la de los geográficos y de hecho suelen diferir sensiblemente. Éstos describen, *grosso modo*, un movimiento de peonza en torno a nuestro eje de rotación, con una periodicidad de unos 10.000 años. En 1980, el polo norte magnético se encontraba al noroeste de Groenlandia, a unas 1.200 millas del polo norte ge-

sición. También en el análisis de datos históricos se ha podido apreciar una disminución continua en lo que se refiere a la intensidad de nuestro gran imán. Esto quiere decir que, de mantener este ritmo, en 4.000 o 5.000 años nuestro campo magnético desaparecerá.

Posiblemente esto deba interpretarse en el sentido de que nos encontramos en la antesala de un cambio de polaridad, de los muchos acaecidos a lo largo de la historia geológica de nuestro planeta. De ser así, brindará una excelente oportunidad al ser humano de aclarar determinadas cuestiones, tales como: ¿Cuánto tardan los polos magnéticos en invertir su posición? ¿Se mantiene la intensi-

dad y simplemente se produce un cambio de posición de los polos? ¿Se produce un cambio de posición, acompañado de una disminución y posterior aumento de su intensidad? ¿Afectará al normal desarrollo de la vida animal en nuestro planeta? Cuestiones que lamentablemente ninguno de nosotros podrá ver resueltas.

Este último punto marca uno de los aspectos que hacen del campo magnético terrestre un capricho de la Naturaleza, que posiblemente ha permitido que nuestro planeta pueda ser considerado como algo extraño y diferente dentro del Universo. La aparición y asentamiento de vida animal ha sido consecuencia de múltiples aspectos, entre otros, un distanciamiento adecuado del Sol. Esto ha permitido la presencia de temperaturas moderadas, compatibles con las formas de vida que conocemos. Asimismo, la existencia del CMT ejerce un efecto protector sobre la vida en nuestro planeta. De no ser por él, el nivel de radiación de alta energía procedente del espacio sería mucho más alto, incluso letal, de forma que el desarrollo y mantenimiento de la vida en la forma actualmente conocida probablemente no hubiera sido posible.

El campo magnético terrestre: tormentas solares y fenómenos de aurora

A la radiación cósmica procedente de las explosiones nucleares, generadas continuamente en multitud de objetos celestes, se le suma la que proviene de la actividad en la corona solar. Un chorro de partículas cargadas (viento solar), compuesto principalmente de protones y electrones, es proyectado continuamente desde el Sol hacia la superficie terrestre.

Al llegar a la zona de influencia del campo magnético terrestre (Magnetosfera) prácticamente todas estas partículas son desviadas, quedando algunas otras atrapadas en órbitas alrededor de la Tierra como pequeños satélites. Ese conjunto de partículas cargadas orbitando se concentran en ciertas regiones a modo de cinturones. Éstos constituyen los conocidos cinturones de **Van Allen**. En ellos, la



5. Midiendo el valor del campo magnético en la península antártica durante la campaña GEODEC-MAR (enero-febrero 2002). Rodeado por hielos y por algunas de las estructuras geológicas más interesantes de ese gran continente.

densidad de partículas cargadas moviéndose a gran velocidad es tan alta que supone siempre un riesgo el atravesarlos para las expediciones espaciales (astronautas y equipos).

La mayor parte del tiempo viajan por encima de la superficie de la Tierra en un vacío casi completo, con muy escasas posibilidades de colisionar con una molécula de aire. Sin embargo, a medida que los electrones y protones se acercan a los polos magnéticos de la Tierra y alcanzan una altitud inferior, donde el aire es más denso, se producen colisiones. En ellas se ionizan los átomos de oxígeno y de nitrógeno de la atmósfera. Estas partículas ionizadas tienden a recombinarse, liberando la energía absorbida en las colisiones en forma de luz. Por todo lo anterior, aparece a los ojos de algunos afortunados observadores un inmenso velo que cae desde el cielo, mostrando una misteriosa apariencia, con colores que van desde el amarillo verdoso al rojo púrpura. Éste es el origen de las conocidísimas auroras (boreales o australes).

Junto con las brillantes auroras, hay otros efectos menos benévolos provenientes de la conexión Sol-Tierra. Con la descarga promedio de 1.500 GW de electricidad que las eyecciones solares realizan en la alta atmósfera, pueden ocurrir grandes cambios en

nuestro espacio. Esa descarga equivale al doble de la capacidad de energía generada por los Estados Unidos. Esos cambios pueden causar estragos en un planeta que depende de satélites, energía eléctrica y comunicaciones de radio, todos ellos susceptibles de ser afectados por fuerzas eléctricas y magnéticas. Estas colosales inyecciones de energía, denominadas tormentas magnéticas, pueden ser peligrosas para los satélites que danzan dentro y fuera de los cinturones de radiación y del viento solar.

Una serie de fulguraciones y eyecciones solares ocurridas en marzo de 1989 produjeron una poderosa tormenta magnética. Después de que las partículas y la energía bombardearan la Tierra, más de 1.500 satélites disminuyeron su velocidad, perdiendo varios kilómetros de altura en sus órbitas, debido a la creciente fricción atmosférica. Pero éste no es el único efecto que las tormentas magnéticas pueden ejercer sobre los satélites. Los electrones de alta energía, excitados y acelerados por una tormenta, pueden degradar los paneles solares empleados para proveer energía a los satélites, y pueden alterar y aun apagar sus microprocesadores.

En 1994, dos satélites canadienses quedaron averiados al sufrir descargas eléctricas durante sendas tor-

mentas magnéticas; como consecuencia de ello, el servicio telefónico canadiense se vio quebrantado durante meses. De modo similar, en enero de 1997, un satélite americano dejó de operar varias horas tras una violenta tormenta magnética. Este hecho interrumpió las señales televisivas, las llamadas telefónicas y parte de la red de monitorización sísmica de los EE.UU.

Las tormentas magnéticas también causan estragos en las señales de radio, alterando los alcances de las comunicaciones. En marzo de 1989, oyentes de Minnesota informaron de la imposibilidad de oír estaciones locales de radio, pudiendo, sin embargo, oír transmisiones de la Patrulla de Autopistas de California. En un caso extremo, las tormentas magnéticas pueden impedir completamente, durante horas y hasta durante días, las comunicaciones alrededor de la tierra, afectando a la intensidad del campo magnético terrestre.

Adicionalmente se pueden producir aumentos de energía en las líneas de alta tensión y ocasionar grandes eléctricas en gasoductos y oleoductos. Esto favorece su corrosión y deterioro de una forma más rápida de lo natural; en las líneas de alta tensión el exceso de electricidad puede quemar sus transformadores y producir apagones. Durante la tormenta de marzo de 1989, un transformador en la central de energía de Nueva Jersey se quemó, viniéndose abajo la alimentación eléctrica de Québec, dejando a seis millones de personas sin electricidad durante horas.

Debido a que mucha información hoy en día es transmitida por satélites y otras tecnologías avanzadas —desde cajeros automáticos y señales de radiodifusión hasta el Sistema de Posicionamiento Global y sistemas de señales de emergencia—, las tormentas magnéticas plantean un riesgo potencial, natural y tecnológico para la vida en la Tierra durante horas y hasta durante días.

Anomalías magnéticas

El CMT no constituye un concepto estático en el sentido de que siempre

haya sido igual, en cuanto a su polaridad e intensidad. De hecho, sus alteraciones la han llevado a un extremo, modificando su polaridad. Estas inversiones han sido frecuentes, como puede apreciarse en los registros geológicos que conforman la historia de nuestro planeta (la última inversión se produjo hace unos 700.000 años aproximadamente). Este último aspecto ha sido clave para el desarrollo de una de las últimas revoluciones que ha tenido lugar en el campo de la ciencia.

Hace aproximadamente 40 años, los registros magnéticos obtenidos en el océano no dejaron lugar a la duda: los continentes se separaban en algunas zonas, aproximándose en otras, como consecuencia de procesos dinámicos que llevaron a la creación y destrucción de fondo marino en las grandes dorsales o cordilleras oceánicas y en las fosas submarinas, respectivamente. A esta teoría, que retomó de alguna forma la vieja idea de la *Deriva de los Continentes*, propuesta a principios del siglo XX por el meteorólogo alemán **Alfred Wegener**, se la conoce como *Tectónica de placas*.

Por otro lado, conviene resaltar una de las aplicaciones prácticas del Geomagnetismo: el estudio de las anomalías geomagnéticas marinas. Este campo es uno de los temas en los que trabajamos en la Sección de Geofísica del **Real Instituto y Observatorio de la Armada**, liderando y/o participando activamente en múltiples proyectos científicos (zona económica exclusiva, campañas antárticas...), en los que hemos utilizado diversos buques (*Hespérides*, *Tofiño*, *Vizconde de Eza*) como plataformas de adquisición de datos.

Hemos visto cómo el campo magnético terrestre adopta una “forma” predecible. Incluso podríamos concebir su aspecto como el que generaría un gran imán o dipolo. Sin embargo, cuando medimos con un magnetómetro en un punto, el valor obtenido no suele coincidir con el esperado. Principalmente esto es debido a que algunos minerales son capaces de generar sus propios cam-

pos magnéticos, alterando, algunas veces enormemente, el valor previsto si sólo existiera el campo magnético dipolar. De la comparación entre el valor previsto y el obtenido realmente, obtenemos una diferencia denominada anomalía magnética. Su análisis ha demostrado ser una información extremadamente útil.

Como ocurre prácticamente con todas y cada una de las disciplinas que conforman la Geofísica, el desarrollo de cada técnica ha venido impulsado por necesidades de la Defensa. Durante la *Guerra Fría*, la altimetría espacial proporcionó un conocimiento sin precedentes del campo gravitatorio terrestre, parámetro fundamental para un vuelo preciso de misiles intercontinentales, o el desarrollo de las redes sísmicas para la detección de explosiones nucleares.

En lo referente al CMT, la necesidad de detectar submarinos impulsó el desarrollo de nuevos magnetómetros. Desde entonces, su aplicación ha sido grande, auxiliando en aquellas situaciones donde se precisara sentir, sin tocar ni ver. Constituye, por tanto, una herramienta auxiliar útil para el trabajo del arqueólogo, o en la detección de pecios, o simplemente científica cuando al cruzar esta información con la proporcionada por otras disciplinas, como la sísmica, la gravimetría o la batimetría, nos permite alcanzar, por ejemplo, un conocimiento de la estructura del subsuelo marino o del subsuelo sobre el que posan capas de hierro de dos o tres kilómetros de espesor. Esta situación se nos presenta en el continente antártico, donde obviamente los estudios de anomalías magnéticas adquieren cierto protagonismo.

Conclusiones

Hemos realizado un recorrido histórico del campo magnético terrestre. Hemos hablado de su origen, de sus peculiaridades, y de cómo esta fuerza física invisible afecta a nuestra vida en una medida muy superior a lo que inicialmente podríamos esperar. ■

(*Revista de Marina*)