

Una visión sobre el estado actual de la investigación en Geomagnetismo

J. M. Torta

En este artículo se examinan los avances recientes en el ámbito general del Geomagnetismo, una de las Ciencias de la Tierra con una más larga historia, seguramente por la importancia que ha tenido para la navegación. La revisión se ha dividido en cuatro grandes áreas y en diversas subdisciplinas dentro de las mismas, finalizando con una visión sobre las posibles líneas de evolución que se auguran para algunas de ellas.

Introducción

No es fácil resumir y estructurar las líneas de actividad actuales de un tema tan extremadamente amplio y multidisciplinar como el Geomagnetismo. En otras áreas del saber, y quizás precisamente en otras ramas de la Geofísica, tal vez no exista tanta relación entre cómo está organizada la Asociación Internacional de referencia y los caminos por los que transcurren los avances o los intereses científicos en cada momento. Eso no es así para el caso particular del Geomagnetismo, y un ejemplo es que, a pesar de que el número de investigadores dedicados al Geomagnetismo y la Aeronomía suele ser una minoría dentro del ámbito general de la Geofísica, las Asambleas de la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA) acostumbran a ser multitudinarias y casi siempre su participación es la mayoritaria cuando se celebran conjuntamente con otras Asociaciones de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG), cuyos delegados tienden a diversificar más su presencia en otros foros o trabajan más al margen de la disciplina o los dictámenes de sus Asociaciones Internacionales. Por lo tanto, quizás una buena forma de estructurar esta revisión sea el hacerlo del mismo modo que está estructurada la IAGA. Eso sí, limitándonos únicamente a aquello que hace referencia al geomagnetismo. La Aeronomía debería ser objeto de un análisis semejante por separado.

1. Campos magnéticos internos

1.1. Teoría de la geodinamo y el magnetismo planetario.

El salto más importante en los últimos años en esta disciplina se produce con la aparición de soluciones numéricas para las ecuaciones magnetohidrodinámicas (MHD) que describen la convección térmica y la generación del campo

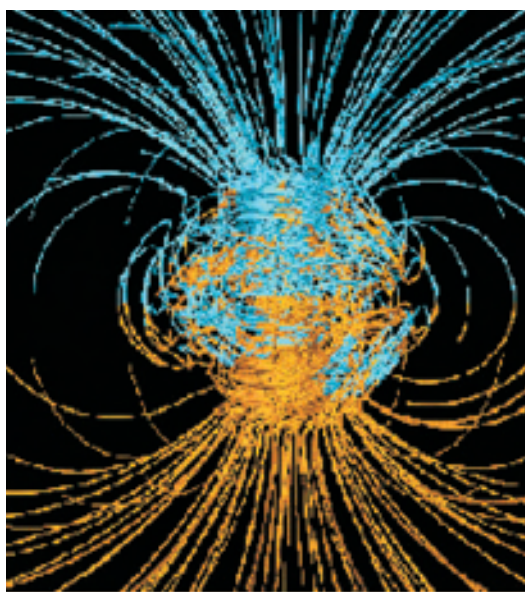


Figura 1. Imagen de la estructura 3D del campo magnético simulado con el modelo de la geodinamo de Glatzmaier y Roberts. Las líneas de campo magnético son azules donde el campo se dirige hacia el interior y amarillas donde se dirige hacia fuera. Fuente: <http://ees5-www.lanl.gov/IGPP/Geodynamo.html>

magnético en un fluido rotando en una capa esférica con un núcleo interno sólido y conductor. Los resultados más recientes hablan de 300.000 años de simulación y la aparición de hasta cuatro inversiones espontáneas.

Estas simulaciones numéricas están proporcionando, pues, resultados razonables acerca de la morfología y la intensidad del campo en la frontera manto-núcleo, son capaces de generar inversiones y excursiones que pueden compararse con las observaciones paleomagnéticas y predicen una rotación diferencial entre el núcleo y el manto. Sin embargo hay todavía una serie de problemas fundamentales, lo que está generando mucha discusión entre los teóricos y los observacionistas, quienes son de la opinión que los modelos están todavía lejos de dilucidar los verdaderos parámetros para el núcleo terrestre.

En esta primera división encontramos la mayor interrelación entre la IAGA y otras asociaciones de la IUGG que promueven el estudio de la tierra sólida, como la de Geodesia (IAG), la de Sismología y Física del Interior de la Tierra (IASPEI) y la de Volcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI). En particular, la comunidad científica dedicada al estudio de la evolución y el estado actual del interior profundo de la Tierra, y los efectos que dicho interior tiene en las estructuras y procesos observados en la superficie, se organiza en torno a la Comisión conocida como SEDI (*Study of the Earth's Deep Interior*), con el ánimo de promover estudios desde distintos enfoques.

Por lo que respecta al magnetismo planetario, los magnetómetros instalados en las sondas espaciales han viajado hoy en día suficientemente cerca de todos los planetas, con excepción de Plutón, para detectar la presencia o ausencia de un campo magnético intrínseco (están incluso apareciendo los primeros trabajos sobre medidas de campo magnético en asteroides). De ellos, sólo Venus y Marte parecen no tener en el presente una dinamo interna como la Tierra, aunque la

tuvieron en sus orígenes. Sin embargo, los campos magnéticos medidos por la Mars Global Surveyor a altitudes comparables con las observaciones en la Tierra revelan que la corteza de Marte es más de un orden de magnitud más magnética que la de la Tierra. Se trata, pues, de un magnetismo remanente, puesto que no deben haber magnetizaciones inducidas, en ausencia de campo magnético principal. Los primeros modelos que se están generando, bien basados en análisis en armónicos esféricos, bien en modelos de fuentes equivalentes, muestran como las anomalías más fuertes aparecen en el hemisferio sur, y su apariencia alargada sugiere un origen asimilable al de la formación de corteza oceánica en las dorsales terrestres, aunque la exacta naturaleza de las mismas es fuente de intenso debate en la actualidad.

1.2. Inducción electromagnética

En los últimos años se han producido avances importantes, por un lado en relación a estudios de laboratorio sobre las conductividades de los minerales del manto, básicamente acerca del establecimiento de relaciones entre conductividad y temperatura, del conocimiento de los procesos de fusión en el manto, o de la existencia de un salto entre 1 y 2 órdenes de magnitud en la conductividad en la zona de transición situada a 400 Km. de profundidad. Por otro lado, estudios recientes a partir de técnicas magnetotélúricas (MT) profundas muestran que la parte superior del manto continental es anisótropa desde el punto de vista eléctrico, lo cual se corresponde con la fuerte anisotropía sísmica obtenida a partir de estudios de separación de las ondas de cizalla. Cuando estas medidas sísmicas y MT pueden combinarse, cada una proporciona importantes restricciones para la interpretación conjunta. Similarmente están proliferando los trabajos destinados a determinar rasgos geométricos y estructurales mediante combinación de medidas MT o de inducción magnética (*Geomagnetic Depth Sounding*, GDS) y de tomografía sísmica.

Se están desarrollando multitud de técnicas electromagnéticas para la caracterización de la conductividad eléctrica del subsuelo para la exploración mineral o para aplicaciones medioambientales, las cuales se están mostrando esenciales hoy en día para la detección de plumas contaminantes o la exploración de vertederos.

Dentro de este mismo apartado, no podemos olvidar el boom que está suponiendo en estas últimas décadas la búsqueda de efectos magnéticos, eléctricos o EM relacionados con eventos sísmicos y volcánicos. Se ha producido un incremento remarcable en la cantidad y calidad de los datos registrados antes y durante numerosas erupciones y terremotos, y cada vez más este tema suscita interés, hasta el punto que se ha anunciado la creación de una comisión conjunta entre la IASPEI, la IAVCEI y la IAGA, cuyo objetivo es el estudio de todos los potenciales precursores sísmicos y volcánicos, incluyendo los efectos magnéticos, geoeléctricos e ionosféricos.

1.3. Paleomagnetismo y magnetismo de las rocas.

Puesto que cualquier explicación convincente de la variación del campo magnético en el tiempo debe basarse en una base de datos global y de calidad, en la actualidad diversos

grupos repartidos por todo el mundo están inmersos en la preparación de bases de datos paleomagnéticos con el objeto de mejorar por un lado la resolución de dichos datos y, por otra, de extender su expansión temporal. Mientras que el conocimiento de la dirección del campo en el pasado es hoy en día bastante detallado, y aunque se está avanzado mucho gracias a programas internacionales como el *Deep Sea Drilling Project*, todavía queda mucho camino por recorrer por lo que respecta a la intensidad del campo, dado que las medidas de paleointensidad son mucho más difíciles de obtener. En el futuro próximo debemos ver como se interpretan esas nuevas bases de datos en términos de la dinámica del núcleo externo.

2. Fenómenos magnetosféricos

Desde los años ochenta el estudio de la magnetosfera terrestre se ha revolucionado gracias a la creciente flota de satélites artificiales equipados con multitud de instrumentos que se encuentran en órbita. Todas esas misiones se coordinan a través del ISTP (*Internacional Solar-Terrestrial Physics Science Initiative*) que une los esfuerzos de la NASA, la ESA y la ISAS, junto con redes de observatorios y radares en tierra e investigaciones teóricas.

Gracias al uso creciente de observaciones multipunto de alta calidad se están estudiando de forma muy activa los procesos dinámicos de fenómenos a gran escala en los constituyentes del plasma magnetosférico, sus interrelaciones y sus evoluciones temporales, durante diferentes condiciones de actividad solar. Por un lado se están describiendo esos procesos (como por ejemplo la dinámica de los anillos de radiación durante tempestades magnéticas) mediante representaciones analíticas y modelos fenomenológicos, y los nuevos modelos e ideas se están validando mediante observaciones en el interior de la magnetosfera durante condiciones de extrema actividad, que incluyen los efectos de las partículas energéticas solares, sus concentraciones, los rayos X, la cinemática del viento solar, etcétera.

Por otro lado se está representando la dinámica de la magnetosfera en tres dimensiones mediante modelos MHD. Los resultados de estas simulaciones muestran como la magnetosfera terrestre actúa como una lente que focaliza las fluctuaciones del viento solar en una región al otro lado de la Tierra donde se origina la mayor parte de la actividad magnética. Asimismo, las series de datos temporales de la magnetosfera se analizan como sistemas dinámicos no lineales. Para condiciones específicas del viento solar, estas técnicas pueden predecir la ocurrencia e intensidad de las tempestades magnéticas, de manera que pueden utilizarse como una herramienta de predicción para meteorología espacial.

Cabe resaltar también la creciente actividad en todo aquello relacionado con el estudio de los mecanismos de excitación, propagación, atenuación y detección de ondas ULF en la magnetosfera. Estas ondas se excitan a través de una gran variedad de procesos relacionados con la física del plasma y su importancia es básica, sobre todo, por su relación con las subtormentas, con el acoplamiento magnetosfera-ionosfera, y con la producción y pérdida de iones y electrones en los anillos de radiación.

3. Viento solar y campo interplanetario

De nuevo, gracias a los satélites del ISTEP, por primera vez se están pudiendo seguir las erupciones solares a través de todo su recorrido, desde la eyección de masa coronal (CME) en el Sol a través del espacio interplanetario, hasta que golpea la magnetosfera terrestre, causando las tempestades geomagnéticas y las auroras. Con el coronógrafo instalado en el SOHO se visualizan las CMEs. Con otros instrumentos a bordo del propio SOHO o del WIND se miden las propiedades del plasma del viento solar; por ejemplo, la velocidad de su flujo, su dirección y la distribución de las energías del electrón e ion. Receptores de ondas de radio monitorizan las emisiones del Sol y del plasma espacial y un magnetómetro toma muestras del campo magnético interplanetario hasta 44 veces por segundo.

Los grupos punteros en estos campos (como el Goddard Space Flight Center de la NASA o el Space and Plasma Physics Group de la Univ. de Maryland) se dedican a ensamblar toda esa información para configurar la anatomía de determinados eventos, desde el principio hasta el fin. Ello incluye su estructura y evolución tridimensional y cómo modifican el estado de la magnetosfera.

En el campo de la predicción es dónde mayores esfuerzos y recursos se están destinando últimamente, dentro del ámbito general de lo que se conoce como la meteorología espacial (Space Weather) que engloba el estudio de las condiciones en el espacio que puedan afectar a la actividad humana. Se han desarrollado diferentes servicios de alertas geomagnéticas y predicciones de actividad solar dirigidas a una amalgama de usuarios potenciales.

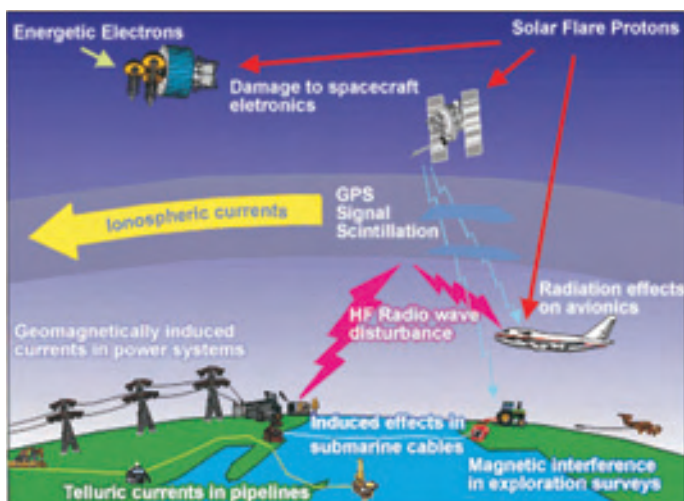


Figura 2. Efectos de la meteorología espacial en los sistemas tecnológicos. Fuente: Geomagnetic Hazards Project del Geological Survey of Canada. http://www.spaceweather.gc.ca/effects_e.shtml

4. Observatorios geomagnéticos, servicios y análisis

4.1. Observatorios geomagnéticos, instrumentos y estándares

Uno de los logros a destacar es la creación hace poco más de una década de la red INTERMAGNET, que agrupa buena parte de los observatorios magnéticos con registro digital, con el objeto de facilitar el intercambio de datos en tiempo

real o casi real. Ello, además, está facilitando la adopción de estándares modernos para la instrumentación.

Los sensores de los variómetros digitales modernos se basan bien en magnetómetros de núcleo saturado (fluxgates), preferiblemente suspendidos y con amortiguamiento viscoso, o bien en magnetómetros escalares rodeados por bobinas de Helmholtz (magnetómetro vector). Por lo que respecta a las mediciones absolutas, éstas vienen realizándose mediante magnetómetros de protones para el campo total y mediante teodolitos amagnéticos con un sensor fluxgate montado sobre su telescopio para la medida de los elementos angulares (DI-flux). De las intercomparaciones de instrumentos que se realizan en los Workshops que se organizan cada dos años sobre observatorios magnéticos, podemos concluir que los mejores DI-flux permiten medir con precisiones de unos pocos segundos de arco, mientras que la de los magnetómetros de protones es de unas pocas décimas de nanoTesla.

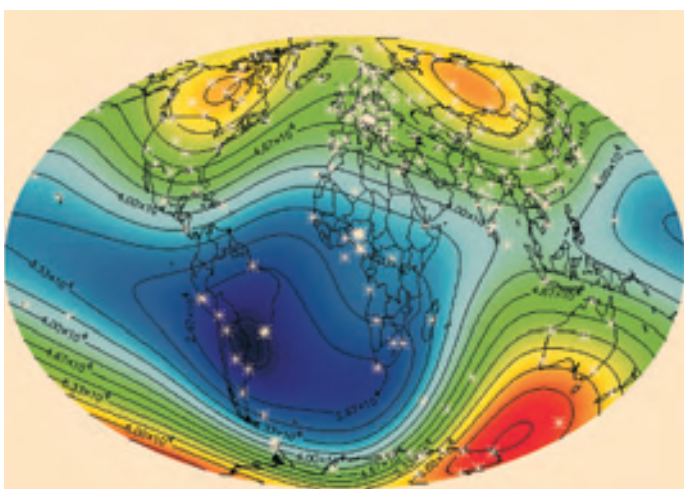


Figura 3. Posiciones de los observatorios geomagnéticos actualmente en operación, superpuestos en una carta de la intensidad total del campo geomagnético para el año 2000 (unidades en nT), basada en el modelo IGRF2000. Fuente: NOAA, NGDC.

Es obvia la irregular distribución de observatorios, estando su densidad claramente correlacionada con la distribución de continentes y océanos, pero apreciándose asimismo una asimetría Norte-Sur, indicando una influencia económica. Con el objeto de mejorar su cobertura global están apareciendo diversas iniciativas para emplazar instrumentos en el fondo marino. Ello, unido al despliegue de estaciones automáticas en islas remotas, puede ayudar a mejorar esa cobertura. Pero no se ha descubierto la estación automática perfectamente estable, con lo que seguimos necesitando visitar a menudo los emplazamientos para realizar medidas absolutas. Una solución, aunque se encuentra todavía en fase de prototipo por parte del laboratorio del Observatorio de Dourbes en Bélgica, sería el uso de un DI-flux automático.

En España están funcionando actualmente cuatro observatorios geomagnéticos (todos ellos con los estándares antes mencionados): San Pablo de los Montes (Toledo) y Güimar (Tenerife) por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), San Fernando (Cádiz) por el Real Observatorio de la Armada, y el Observatorio del Ebro en Roquetes (Tarragona) por una Fundación multi-institucional de carácter científico con su mismo nombre. Este último, desde 1996, se ocupa también

del mantenimiento de un observatorio en la Isla Livingston, en la Base Antártica Española. La ocupación de la red de estaciones seculares y la elaboración de las cartas magnéticas nacionales corre a cargo del IGN.



Figura 4. Sistema de bobinas de Helmholtz y magnetómetro de precesión de protones que configuran el magnetómetro vector del Observatorio Geomagnético de la Isla Livingston, Islas Shetland del Sur, Antártida.

4.2. Datos, índices y aplicaciones

Este Working Group se ocupa de establecer los estándares para la diseminación de los datos (hace poco se ha tenido que cambiar el formato de intercambio para tener en cuenta el cambio de siglo, lo que se ha aprovechado para racionalizar o modernizar todo el formato), de la producción de los índices geomagnéticos, y de la búsqueda de aplicaciones para agencias o fines industriales de esos datos e índices, lo que entronca en gran medida de nuevo con el *Space Weather*.

Las necesidades actuales exigen que esa información aparezca en tiempo real o casi real, de manera que la preparación y la definición de muchos de esos índices se ha tenido que replantear. Para un determinado índice, generalmente existe un compromiso entre rapidez en el suministro del mismo y precisión, de manera que una de las preocupaciones de los grupos que se ocupan de la preparación de estos índices o listas de eventos es averiguar si los que se están actualmente produciendo realmente se ajustan a las necesidades de los usuarios potenciales.

4.3. Campañas magnéticas terrestres y planetarias mediante satélites

A pesar de que ya desde la época de los Sputnik ya se empezaron a poner magnetómetros en ciertos satélites artificiales, hasta el Magsat (1979-1980) no tuvimos la precisión necesaria en la medida de la dirección del campo para producir datos vectoriales de suficiente calidad para la modelización global del campo geomagnético; y no la hemos vuelto a tener hasta bien entrado 1999 cuando se lanzó el Oersted.

A finales de los 90, ante el anuncio del lanzamiento de hasta tres satélites que estuvieran operacionales el tiempo suficiente para proporcionar información acerca de los procesos en el núcleo y de las interacciones Sol-Tierra, se decidió establecer una Década para la Investigación geopotencial. El solapamiento de todas esas misiones no sólo va a permitir analizar el campo interno, su variación secular y los campos de origen externo con una precisión y extensión hasta el momento inéditas, sino que, además, se está demostrando cómo la interpretación conjunta de datos de más de un satélite proporciona una mejor corrección para los campos magnetosféricos, cuando estos son considerados como ruido, al tratar de aislar la contribución nuclear o litosférica. Para facilitar la utilización conjunta de estas series, que cubren distintas geometrías de visión, tiempos locales y niveles de perturbación, se está dando acceso a determinados subconjuntos de las mismas y se están organizando sesiones en la mayoría de congresos internacionales de nuestro ámbito para su discusión.

4.4. Análisis global y regional del campo geomagnético y su variación secular

Tiene como principal cometido el generar cada aproximadamente cinco años el modelo de campo geomagnético internacional de referencia o IGRF. También da cabida a los que se dedican al análisis regional, y mantiene un catálogo sobre los servicios magnéticos globales y regionales, y los distintos modelos y cartas.

Los modelos que están apareciendo últimamente son definitivamente más precisos, no sólo por poder disponer de datos de satélite con cobertura global, sino también por el hecho de tener acceso a todos los datos de muchos de los observatorios con relativa facilidad y premura. Ello permite seleccionar los periodos de mayor calma magnética, evitando la tradicional costumbre de utilizar medias anuales o mensuales de todos los días y horas, que están todavía moduladas por variaciones estacionales y undecenales de origen externo y, por tanto, adulterando cualquier análisis del campo nuclear.

La iniciativa reciente más ambiciosa, impulsada hace poco más de un lustro por el Goddard Space Flight Center, para modelar campos debidos no sólo a las fuentes del núcleo terrestre sino también a las de la litosfera hasta un determinado grado y orden, a las ionosféricas en días de calma y a las magnetosféricas, se conoce como el modelo íntegro del campo magnético próximo a la Tierra (Comprehensive model). Se trata de coestimar a la vez los campos de todas esas fuentes, en cada caso utilizando las funciones base y las longitudes de las expansiones en serie más adecuadas. De esta manera, la última versión utiliza alrededor de 500.000 datos, incluyendo los de los satélites POGO y MAGSAT y valores medios horarios y anuales de observatorios magnéticos, resultando en más de 16000 parámetros. Ello se traduce en ajustes generalmente superiores a cualquier modelo previo y una separación de los campos aparentemente razonable o realista.

4.5. Análisis y modelización de las variaciones del campo geomagnético

Puesto que la mayoría de las veces los datos son los mismos (aunque la señal para unos sea ruido para otros), las técnicas de modelización a menudo son semejantes, y la tendencia es que en la elaboración de los modelos se sumen experiencias diversas, más allá de la usual división en subdisciplinas, los integrantes de este Working Group están pidiendo unirse al anterior. Ello se está viendo forzado, por otra parte, por la aparición de modelos como el Comprehensive model que contempla unas y otras variaciones.

4.6. Análisis de anomalías magnéticas

Para escalas continentales u oceánicas, han sido y están siendo fundamentales de nuevo los datos de satélite (especialmente cuando las órbitas son de baja altura), y los resultados para la definición precisa de las anomalías litosféricas de media y larga longitud de onda van a aparecer muy pronto, ante el flujo continuo de datos de los nuevos satélites anteriormente citados. Para estudios de más detalle están resultando igualmente de gran utilidad las compilaciones recientes de levantamientos magnéticos aéreos y marinos, bien a nivel del Ártico y del Atlántico, de la Antártida, etcétera, o incluso a nivel global.

Conclusiones

El Geomagnetismo, una de las disciplinas científicas que emergieron desde más antiguo, sigue en constante evolución, aprovechando los avances en las técnicas de computación, las nuevas posibilidades de la exploración espacial o los desarrollos instrumentales. Hemos visto, por ejemplo, que las simulaciones recientes de la dinámica del núcleo terrestre suponen un avance realmente espectacular en un tema que, el propio Einstein, consideraba uno de los problemas más importantes no resueltos de la Física. Otros ejemplos, de cómo se prevé que puedan evolucionar algunas de las diferentes subdisciplinas mencionadas en el texto, se resumen a continuación.

El futuro de la Física Solar-Terrestre pasa indudablemente por atender a la importancia que está representando la predicción de los efectos derivados de la actividad solar. Cuando se empezó a trabajar en este campo, se asumía que cuando sucedía una eyección de masa en el Sol, debería aparecer con toda probabilidad una perturbación magnética en la Tierra al cabo de determinadas horas o días. Hoy en día sabemos que eso no es siempre así, sino que dependiendo de cómo los campos magnéticos de las nubes de plasma están orientados determina si tendrá lugar el fenómeno de la reconexión magnética o no. De esta forma, para saber que ocurrirá en la Tierra debemos saber no sólo qué ocurrió en el Sol sino también la naturaleza de los campos que viajan con el viento solar. Por tanto el futuro pasa por ubicar más satélites entre el Sol y la Tierra.

Las investigaciones para mejorar esas predicciones se mueven en dos áreas mayoritarias. Por un lado, en tratar de refinar la correlación entre los fenómenos o síntomas observables con los efectos en la Tierra, puesto que, en general, todavía no se puede predecir esos efectos con la precisión que se desearía. Por el otro lado, en la construcción de un

modelo completo del medio solar-terrestre. Esta modelización, como la de la dinámica del núcleo de la Tierra y la generación del campo geomagnético, es un problema muy complejo puesto que la física del mismo incluye no sólo la dinámica de fluidos sino también las ecuaciones de Maxwell. Además, el problema incluye tres dominios diferentes, es decir, el Sol, el medio interplanetario y la magnetosfera, con sus numerosas regiones y sistemas de corriente. Esos dominios no están en absoluto separados, y cualquier cambio en uno de ellos puede tener consecuencias en la Tierra.

Por lo que respecta a la instrumentación, se está deseando que el automatismo prometido para los DI-flux se haga realidad. Ello comportaría que los observatorios magnéticos pudiesen trabajar de manera completamente automática. En cuanto a las observaciones en el fondo marino donde, debido a la opacidad del agua salada, no pueden usarse métodos astronómicos o mediante satélites para determinar el Norte geográfico, deberán incorporarse sensores de la rotación de la Tierra mediante giroscopios. Mientras que, para el DI-flux automático ya se han podido construir decodificadores de ángulos y motores paso a paso completamente amagnéticos, los giroscopios todavía no lo son hoy en día. Resultaría asimismo interesante la instalación de instrumentos con fluxgates triaxiales perfectamente acoplados con cámaras de seguimiento estelar, lo que proporcionaría una alternativa a considerar para la automatización de observatorios con una buena proporción de noches despejadas.

Finalmente, el progreso en la exploración del campo geomagnético desde el espacio deberá venir no sólo de la obtención de más y mejores datos, sino también del refinamiento de los métodos de análisis y modelización. Así, una de las limitaciones de los modelos como el Comprehensive Model es que son estacionarios, es decir, no tienen en cuenta, por ejemplo, la variabilidad día a día de las corrientes ionosféricas que generan la variación diurna del campo. La obtención un modelo "dinámico" sería sólo posible si dispusiéramos de mediciones simultáneas (en Tierra y en el espacio) en distintos emplazamientos. La monitorización multipunto en el espacio más próximo es pues imprescindible si se quieren separar con precisión las variaciones espaciales de la temporales y sacar verdadero partido de la precisión con la que se puede medir hoy en día el campo geomagnético.

Bibliografía recomendada

- [1] GLATZMAIER, G.A., P.H. ROBERTS, A Three-Dimensional Self-Consistent Computer Simulation of a Geomagnetic Field Reversal, *Nature*, 377, 203-209, 1995.
- [2] HEINSON, G., Electromagnetic studies of the lithosphere and asthenosphere, *Surveys in Geophysics*, 20, 229-255, 1999.
- [3] TEZKAN, B., A review of environmental applications of quasi-stationary electromagnetic techniques, *Surveys in Geophysics*, 20, 279-308, 1999.
- [4] JOHNSTON, M.J.S., Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity, *Surveys in Geophysics*, 18, 441-475, 1997.
- [5] SONG, P., H.J. SINGER, G.L. SISCOE, Space Weather, AGU Geophysical Monograph 125, Washington D. C., 440 pp., 2001.
- [6] OLSEN, N., E. FRIIS-CHRISTENSEN, T. MORETTO, New Approaches to Explore the Earth's Magnetic Field, *J. Geodynamics*, 33, 29-41, 2002.
- [7] CAMPBELL, W.H., Earth magnetism, A guided tour through magnetic fields, 151 pp., Harcourt Science and Technology Company, San Diego, 2001.

J. M. Torta

*es director del Observatorio del Ebro. CSIC-URL.
Roquetes. Tarragona*