

IMÁGENES ELECTROMAGNÉTICAS DEL INTERIOR DE LA TIERRA: PARTE III

Enrique Gómez Treviño
CICESE, Ensenada, Baja California.

Parte I: Geos, Vol. 16, No. 3, 152-154.

Parte II: Geos, Vo. 17, No. 2, 104-106.

Parte III.

En la parte I de presente artículo se precisó que el término *imágenes electromagnéticas* del interior de la Tierra, se refiere a imágenes que se construyen a partir de la determinación de las variaciones internas de la conductividad eléctrica de la Tierra. La conductividad eléctrica es la propiedad electromagnética de las rocas que mejor se puede medir desde la superficie de la Tierra, y con la que se pueden obtener, desde imágenes someras de apenas unos metros de profundidad, hasta imágenes profundas que comprenden centenares de kilómetros. Por otro lado, también es un hecho que la conductividad eléctrica no puede determinarse por ningún otro medio que no sea el que se establece en su definición. Esto es, resulta absolutamente necesario hacer que fluya corriente eléctrica en la región de interés. En la parte II pasamos revista de las diferentes formas que existen para hacer que fluya corriente eléctrica a grandes profundidades en la Tierra. En el presente número veremos cómo se detectan indirectamente los efectos de estas corrientes, así como las limitaciones que impone la naturaleza a la utilización de los fenómenos electromagnéticos para estudiar el interior de la Tierra. También pasaremos revista a algunas barreras psicológicas que resultan de considerar, por un lado, la escrupulosa exactitud y belleza de las ecuaciones de Maxwell, y por el otro, la complejidad y el desorden que caracterizan a la inquieta superficie de la Tierra.

4. LAS GRANDES LIMITACIONES

En general, cuando se habla de métodos geofísicos se sobreentiende que se trata de técnicas basadas en mediciones realizadas en la superficie de la Tierra, y que el objetivo final de su aplicación es obtener imágenes de las profundidades. Cuando se dispone de perforaciones profundas, existen dispositivos especiales que permiten realizar mediciones dentro los pozos, las cuales pueden combinarse con las mediciones de superficie para estimar las propiedades físicas de las rocas en las regiones circunvecinas. En estos casos las dificultades que se tienen para obtener imágenes del subsuelo son mucho menores que cuando se trabaja enteramente desde la superficie. En este último caso estamos restringidos a estudiar el objeto de interés solamente desde arriba. En relación con este aspecto, existen algunas excepciones dentro de los métodos geofísicos. Tal es el caso de la sismología global, en donde se tiene que el interior de la Tierra puede estudiarse prácticamente desde cualesquier lado, ya que las señales sísmicas que se producen

en determinada región, pueden detectarse en cualesquier otro punto de la superficie de la Tierra después de atravesar el planeta. La situación es parecida a la de obtener tomografías del cuerpo humano, ya sea de rayos X o de ultrasonido, en donde el área de interés se puede estudiar desde varios lados. En contraste, en la mayor parte de los problemas geofísicos se presenta la situación de tener que trabajar desde un solo lado, y aun así tratar de obtener imágenes como si la región de interés hubiese sido estudiada desde varios lados. El caso que nos ocupa de imágenes electromagnéticas pertenece a esta categoría.

Otro de los aspectos que caracteriza a los fenómenos electromagnéticos con que se trabaja en geofísica, es que su longitud de onda es generalmente mayor que el tamaño del objetivo. Se sabe desde hace mucho tiempo que para poder ver un objeto con claridad, se requiere iluminarlo con luz de una longitud de onda mucho menor que el tamaño del objeto. Podemos ver claramente y con bastante definición infinidad de cosas a nuestro alrededor porque su tamaño es mucho mayor que la longitud de onda de la luz. Con la misma luz y con la ayuda de un microscopio podemos incluso ver con perfecta claridad objetos tan pequeños que a simple vista resultan invisibles. Sin embargo, los microscopios ópticos comunes dejan de ser efectivos cuando se intenta utilizarlos con objetos de un tamaño comparable con la longitud de onda de la luz. Las imágenes se vuelven borrosas y dejan de tener sentido cuando el objeto es mucho más pequeño que la longitud de onda de la luz. Es muy poco lo que se puede hacer para recuperar una imagen nítida en estas condiciones. De hecho la microscopía optó por cortar por lo sano. Se abandonó el uso de la luz en tales casos y se procedió a utilizar un haz de electrones, los cuales se comportan como ondas de una longitud de onda mucho menor que la de la luz. De esta manera se venció la limitación impuesta por la naturaleza en el caso de los microscopios ópticos.

La aplicación de los fenómenos electromagnéticos para ver el interior de la Tierra se presenta como un problema análogo al anterior, aunque de diferente escala y de mucho más difícil solución. Necesariamente tenemos que usar longitudes de onda muy grandes, mucho mayores de las deseables. Esto se debe a que las ondas electromagnéticas de longitud de onda pequeña se atenúan tremendamente al penetrar en la Tierra. La única manera de aumentar la profundidad de penetración es aumentar la longitud de onda, con lo cual necesariamente se pierde resolución. A esto hay que agregar que las ondas de mayor interés, aquellas capaces de penetrar más allá de los primeros dos o tres metros, dejan de comportarse propiamente como ondas, debido a que se disipan casi completamente a una profundidad de apenas una fracción de su longitud de onda. Esto significa que en una escala de apenas unos pocos metros

la Tierra se comporta como un espejo metálico. La mayor parte de la energía se refleja y el resto se disipa en el interior de la Tierra en forma de calor.

Esto significa que no podemos contar con ondas reflejadas que provengan de discontinuidades a profundidad, como sería el caso de cualquier fenómeno ondulatorio, sino más bien con efectos indirectos del grado de disipación a diferentes profundidades. Afortunadamente la profundidad a la que la Tierra se comporta como un espejo aumenta al aumentar la longitud de onda, por lo que podemos explorar regiones cada vez más profundas con solo aumentar esta longitud. Sin embargo, esto también significa que lo que ganamos en profundidad lo perdemos en resolución.

Según lo anterior, la aplicación de fenómenos electromagnéticos en geofísica muy bien puede compararse con la microscopía óptica: ambas tienen límites impuestos por la naturaleza misma de los fenómenos que utilizan, y en ambos casos el problema tiene su origen en ondas de longitudes mayores que lo deseable. En cuanto a la solución encontrada en microscopía para vencer estos límites en la forma del microscopio electrónico, también existe analogía entre los otros métodos geofísicos. Es posible tener ondas de longitudes mucho menores que las electromagnéticas a grandes profundidades en la Tierra. Esto es, fenómenos ondulatorios cuya energía se disipa en mucha menor medida que la energía electromagnética. No se trata en este caso de ondas de materia como en el caso de los electrones, sino de ondas mecánicas que producen los sismos, o que pueden producirse artificialmente mediante explosiones. Gran parte de la energía sísmica se transmite en la Tierra en longitudes de onda mucho menores que las de la energía electromagnética, además de que las ondas sísmicas atraviesan completamente la Tierra, cosa que no sucede con las ondas electromagnéticas. Es muy interesante darse cuenta que si bien las ondas sísmicas con su menor longitud de onda son capaces de ver objetos de menor tamaño, de ninguna manera logran salvar con esto las limitaciones impuestas por la naturaleza a las ondas electromagnéticas. Se trata simplemente de fenómenos físicos diferentes y como consecuencia sus respectivas imágenes serán necesariamente independientes. Aun en el caso bastante común de que ambos tipos de imágenes muestren la presencia del mismo objeto, se tratará de zonas anómalas de diferentes propiedades físicas, por lo que la obtención de una de las imágenes, aunque esta sea de mejor resolución, de ninguna manera elimina la necesidad de la otra pues cada una provee de información independiente y ambas son necesarias. Esto es como el ver y el tocar, una cosa lleva a la otra y al final uno queda más seguro. 'Ver para creer', dijo Santo Tomás. 'Ven.....y palpa mi costado', agregó Jesús para convencerlo. O como dice el refrán: 'Si digo que la burra es parda es porque traigo los pelos en la mano, no nomás porque la *haiga* visto'.

Además de las diferencias de escala, los métodos electromagnéticos en geofísica difieren de los utilizados en la microscopía óptica en que en este último caso, de ninguna manera se obtienen imágenes utilizando longitudes de onda

mayores que los objetos de interés. Sin embargo, para los métodos electromagnéticos, es precisamente aquí en donde empieza el trabajo, ya que necesariamente hay que recuperar una imagen a través del procesamiento e interpretación de lo que aparentemente son mediciones sin mucho sentido. La ventaja de trabajar con longitudes de onda gigantescas, es que nosotros mismos, así como nuestros aparatos de medición, resultan más pequeños que la longitud de la onda, así como también más pequeños que las variaciones laterales de la onda. Esto nos permite movernos dentro de la onda, aunque solo sea sobre la superficie de la Tierra, y así estudiar sus variaciones laterales al mismo tiempo que controlamos la profundidad de penetración mediante la longitud de onda. De esta manera cubrimos tanto las variaciones laterales de la región de interés como sus propiedades a diferentes profundidades. Por supuesto que las mediciones por sí solas no representarán una imagen muy nítida, ya que debido a las grandes longitudes de onda utilizadas tendrán mezclados los efectos de cuerpos u objetos circunvecinos. Sin embargo, si consideramos que las leyes del electromagnetismo determinan el tipo y la naturaleza de estas combinaciones de efectos, el proceso puede ser revertido matemáticamente y de alguna manera se puede optimar la calidad de las imágenes. Esto es, quitarles lo borroso. En el próximo número trataremos este aspecto. Antes es necesario hablar un poco acerca de la materia prima para estos procesos matemáticos. Esto es, necesitamos considerar primero las mediciones de campo.

5. ¿QUÉ SE MIDE EN EL CAMPO?

Las leyes que rigen los fenómenos electromagnéticos fueron estableciéndose poco a poco a través de muchos años, y fueron magistralmente resumidas hace poco más de un siglo por James C. Maxwell en un conjunto de ecuaciones que actualmente lleva su nombre. Estas leyes no son otra cosa que expresiones matemáticas que relacionan conceptos tan familiares como la distancia y el tiempo, con otros menos intuitivos, dentro de las cuales se encuentran algunos que ya han pasado al lenguaje cotidiano, como lo son los de *corriente eléctrica* y *voltaje*. Las antiguas observaciones de fenómenos debidos a la electricidad estática y a los imanes, se fueron desarrollando con los años a través de innumerables experimentos y arriesgadas suposiciones teóricas, llegando a culminar en una serie de relaciones y de conceptos cuantitativos admirablemente exactos. Prácticamente todas las ramas de la física debieron ser modificadas con el advenimiento de la teoría de la relatividad. No así las ecuaciones de Maxwell. Formadas unos cuarenta años antes, estas ecuaciones ya eran compatibles con el principio de relatividad. Lo que Einstein hizo en su famoso artículo de 1905 fue modificar las leyes de Newton para hacerlas compatibles con las leyes del electromagnetismo. Como si esto no fuera suficiente, el original y controvertido enfoque del electromagnetismo clásico de formular las interacciones en términos de campos físicos en lugar de fuerzas, no solo salió bien librado con el tiempo sino que incluso se extendió a otras ramas de la física.

No obstante lo anterior, es en el aspecto de aplicaciones prácticas en lo que es más conocida la teoría electromagnética. En su mayor parte estas aplicaciones se realizan en ambientes controlados, en donde las dimensiones y propiedades físicas de los materiales involucrados se conocen perfectamente. Por ejemplo, los conductores por donde circula la corriente eléctrica y se transmiten señales generalmente tienen forma perfectamente cilíndrica para predecir fácilmente su comportamiento. Los sistemas de generación, distribución y consumo de energía eléctrica, los de cómputo y comunicación, así como las modernas fibras ópticas e innumerables accesorios de las mismas, todos se diseñan en estricta consonancia y exactamente como lo requieren las ecuaciones de Maxwell, pues si no se obedecen las leyes las cosas simplemente salen mal. Los aparatos representan, en muchos sentidos, ingeniosas combinaciones de los mismos tipos de elementos que fueron alguna vez utilizados en los laboratorios para el descubrimiento de las leyes. En gran medida se trata de un simple cambio de escala pues las condiciones siguen estando controladas. ¿Y si las condiciones no están tan controladas? ¿Qué pasa por ejemplo cuando alguno de los elementos del aparato se quema, y el aparato mismo deja de funcionar o funciona mal? ¿Seguirán gobernándose las diversas funciones, aunque ahora bastante distorsionadas, por las mismas ecuaciones de Maxwell? Sabemos que sí. Precisamente sobre esta suposición se basan los especialistas para realizar reparaciones. ¿Y si no sabemos las propiedades físicas de los materiales de que están hechos los aparatos, ni sus dimensiones, ni su geometría, ni su temperatura, ni su grado de humedad, ni su composición? ¿Y si tampoco podemos inspeccionarlos por dentro, y si sabemos que están inundados hasta la mitad, y que fueron balaceados no se sabe cuando, y que parte de su interior esta fundiéndose y hay humo y fuego saliendo por varias partes? ¿Y si para colmo de males estos aparatos se encuentran en una nave espacial a miles de kilómetros de la Tierra? ¿Seguirán gobernándose las diversas funciones, para este momento irreconocibles, por las mismas ecuaciones? Sabemos que en este caso también debe ser así. Las leyes que en un tiempo fueron descubiertas en un laboratorio en condiciones a veces increíblemente artificiales, rigen el comportamiento en mar y tierra, y aun en el cielo, de los fenómenos estudiados. Las cosas de ninguna manera tienen por qué ser así, pero así es como son. Esto se ha venido reafirmando con el tiempo a través de cada nueva aplicación.

En el caso de la aplicación de las leyes del electromagnetismo a la Tierra, existen algunas barreras psicológicas que hay que vencer, sobre todo para quienes conocen los detalles de estas leyes y no han tenido contacto con la geofísica. ¿Serán aplicables a la Tierra las ecuaciones de Maxwell, las cuales fueron establecidas en laboratorios casi antisépticos y en condiciones completamente controladas? En la Tierra hay montañas y ríos, y carreteras y casas, y actualmente abundan los basureros. En estas condiciones las corrientes eléctricas habrán de circular, además de que tendrán que desviarse o interrumpir su camino por causa de algún desfiladero. El mar, al contener tantas sales y ser un excelente conductor de la electricidad, canalizará gran parte de estas

corrientes las cuales, además, estarán afectadas por tantas plantas generadoras de energía eléctrica como existen actualmente, y sobre todo por las líneas de distribución que llegan a extenderse de costa a costa en todos los continentes. Seguramente se podría aceptar la idea de que las ecuaciones de Maxwell son aplicables a mediciones en la Tierra, pero difícilmente se aceptaría que se pudiese llegar a resultados cuantitativos. Tal vez valores globales de conductividad, obtenidos con alguna aproximación bastante burda, a la que se habría llegado mediante la introducción de innumerables constantes empíricas a las que todavía se les está buscando sentido. ¿Cómo podrían ser cuantitativamente utilizados conceptos tan delicados, aprendidos con tantos esfuerzos y tan substanciosos para el ego, como los del *campo electromagnético*, *divergencias y rotacionales*, *tensores e invariantes*, *teoremas de Green, Stokes, Gauss y demás*, en ambientes tan mundanos? Se requeriría ser extremadamente escrupuloso en la realización de las mediciones, en la eliminación de señales extrañas, en la compensación de los efectos topográficos, en el procesamiento e interpretación final de los datos, a tal grado que tal vez ni valga la pena intentarlo. Todo lo anterior no son solamente prejuicios. Son también puntos de vista que muy bien podrían haber sido escritos en la sección de comentarios para justificar el rechazo de un proyecto de investigación. Por supuesto que todo esto ya pasó. En la actualidad existe una disciplina que aplica rigurosamente las leyes del electromagnetismo para estudiar con diversos fines el interior de la Tierra.

Volviendo al título de la presente sección: ¿Que se mide en el campo? Se mide exactamente lo mismo que se mide en el laboratorio, pero con más cuidados.

6. MEDICIONES DE CAMPO

Según se mencionó anteriormente, las ecuaciones que rigen los fenómenos electromagnéticos involucran cantidades tan familiares como lo son la distancia y el tiempo. La distancia se refiere a la posición de cualquier punto en el espacio con respecto a algún punto especial de referencia. En nuestro caso esto significa saber en dónde se encuentra la fuente de los campos electromagnéticos, así como el lugar en que se realiza la medición de estos campos. La determinación de la distancia se realiza mediante cintas métricas comunes, distanciómetros ópticos o electrónicos, posicionadores por satélite o simplemente realizando localizaciones en un mapa. El método utilizado depende de la exactitud requerida según la aplicación particular y la escala del problema.

Por otro lado, el tiempo se refiere a la variación temporal de la corriente eléctrica en la fuente, así como a la correspondiente variación temporal de los campos en el lugar donde se realiza la medición. Generalmente se realiza un comparación entre estas dos variaciones tomando como referencia la de la fuente. En el caso de mediciones en el dominio de la frecuencia se mide el retraso de una variación periódica del tipo *Asen (wt)* en la señal en el receptor, la cual es producida

por una variación idéntica de la corriente en el transmisor. Las variaciones temporales de tipo *Asen* (wt), donde t representa tiempo, son las únicas señales capaces de conservar su tipo independientemente de los materiales que atraviesen, con la única condición de que se comporten linealmente, el cual es el caso de los diferentes materiales en la Tierra. Cualquier otro tipo de señal periódica, como por ejemplo una onda cuadrada, necesariamente se deforma en la interacción con medios conductores de la electricidad. Por esta razón son muy útiles en la geofísica así como en muchas otras disciplinas. Con sólo medir su amplitud (A) y el retraso correspondiente se sabe todo lo que hay que saber sobre la señal y sobre la información que contenga. La frecuencia angular w y la intensidad de la corriente de la fuente son cantidades conocidas que por lo general están controladas por el operador del transmisor. La medición del retraso se realiza comparando la señal en el receptor con la del transmisor, para lo cual se puede utilizar un cable que conecte a ambos, o bien se determina mediante el uso de relojes en sincronía que posean la suficiente exactitud. Para medir la amplitud de la señal no se requiere referencia alguna. Es importante recordar que en el presente caso de oscilaciones amortiguadas el retraso de la señal no se debe a la velocidad finita de las ondas electromagnéticas, como sucede en la mayor parte de las aplicaciones, sino al efecto disipativo de la Tierra como material conductor.

En el caso de mediciones en el dominio del tiempo se transmiten señales periódicas pero no del tipo *sen* (wt), las cuales conservan su forma original, sino formas de onda susceptibles de deformarse por los efectos de los conductores. En este caso la información sobre la distribución de la conductividad en la Tierra se encuentra en el grado de deformación de la señal. Por ejemplo, los materiales poco conductores se reconocen porque distorsionan poco las señales, debido a que en ellos se disipa relativamente poca energía. En el dominio del tiempo, se requiere conocer la variación temporal detallada de la forma de la señal en un periodo completo, no solamente de su amplitud y retraso. A primera vista esto parecería indicar que se requiere de mayor número de mediciones en el dominio del tiempo, que en el de la frecuencia, ya que hay que registrar la variación de la señal a lo largo de un periodo completo. Esto en realidad no es así, ya que en el dominio de la frecuencia se necesita realizar mediciones utilizando muchas frecuencias para poder sintetizar los valores obtenidos en el dominio del tiempo. Para quienes estén familiarizados con las series de Fourier esto no es ninguna sorpresa. Simplemente quiere decir que una función periódica cuya variación es arbitraria, es equivalente a la suma de un número infinito de funciones de la forma *sen* (wt) que se obtienen variando la frecuencia angular w .

En cuanto a las mediciones mismas de la señal, estas se realizan a través de manifestaciones medibles del campo electromagnético. La forma universal de medir estas manifestaciones es a través de mediciones de voltaje. Los voltajes asociados con corriente continua pueden medirse utilizando voltímetros comunes y corrientes de los que abundan en prácticamente cualquier laboratorio. Menos populares son

los osciloscopios, los cuales permiten medir voltajes que varían con el tiempo en forma arbitraria. Estos dos tipos de aparatos son indispensables en cualquier laboratorio de electrónica, pues cubren prácticamente cualquier requerimiento para la medición de voltajes. Si bien en el campo no se utilizan directamente estos equipos por razones de portabilidad y precisión, los que se utilizan se basan en los mismos principios y deben además tener la capacidad para procesar las señales, sin contar con que deben poseer altísimas impedancias de entrada para adaptarse a condiciones adversas del terreno.

Las mediciones de voltaje se relacionan de una manera muy simple con el campo eléctrico. Se puede demostrar fácilmente utilizando una de las ecuaciones de Maxwell, la ley de Faraday, que si se tiende un cable recubierto de material aislante en la Tierra y sus extremos se ponen a *tierra* mediante un par de electrodos, el voltaje inducido a través del cable dividido por la longitud del mismo, representa el promedio de la componente del campo eléctrico tangencial al cable. En principio, el cable puede describir una trayectoria arbitraria, si es que nos interesa conocer el promedio de la componente tangencial al cable. Sin embargo, generalmente lo que interesa es estimar las componentes del campo eléctrico en dos direcciones ortogonales. En tal caso los cables se tienden a lo largo de las direcciones de interés. En el caso de mediciones de campos asociados con corriente continua la trayectoria del cable es irrelevante ya que en este caso el campo eléctrico es conservativo y el voltaje que se mide a través del cable es independiente de la trayectoria. Esto también se cumple en mediciones de campos de baja frecuencia. En general, la trayectoria que describe el cable es importante solamente en casos en que se utilizan frecuencias muy altas.

Las mediciones de voltaje se pueden también relacionar fácilmente con el campo magnético en el caso de campos variables en el tiempo. Se puede demostrar utilizando una de las ecuaciones de Maxwell, también en este caso con la ley de Faraday, que si formamos una espira con un cable, el voltaje medido es directamente proporcional al promedio de la componente del campo magnético dirigida perpendicularmente a la espira. De esta manera se puede estimar cualquier componente del campo magnético. Generalmente se colocan tres de tales espiras en direcciones ortogonales. En la práctica se utilizan espiras de muchos miles de vueltas debido a que los campos magnéticos que hay que medir son extremadamente pequeños. Por otro lado, debido a que los voltajes inducidos en estos casos son también directamente proporcionales a la frecuencia del campo magnético, este tipo de dispositivo, conocido como bobina de inducción, no se puede utilizar para medir campos magnéticos asociados con corriente continua. Para este caso especial existen detectores que responden directamente al campo magnético, independientemente de la frecuencia de la señal.

Generalmente, cuando se utilizan fuentes o transmisores artificiales, en el campo se miden, o campos eléctricos, o bien campos magnéticos, pero no ambos. En estos casos las

mediciones se normalizan de alguna manera por la intensidad de la fuente ya que ésta se encuentra bajo el control del operador y puede medirse fácilmente. Con esto se eliminan variaciones artificiales debidas a fluctuaciones en la fuente, y que pueden confundirse con las variaciones de interés asociadas con los efectos provenientes del interior de la Tierra. Sin embargo, cuando no se conoce la intensidad de la fuente, como sucede en el caso del método magnetotélúrico, las cosas se complican y resulta necesario eliminar de alguna manera las variaciones artificiales asociadas con las fluctuaciones de la fuente. En este caso se recurre a medir simultáneamente, tanto campos eléctricos como magnéticos, y a reducir las mediciones a razones de los campos para eliminar las fluctuaciones de la fuente. En estos casos se requiere procesar los datos utilizando tensores y buscar en los mismos cantidades invariantes. Esto último es para eliminar el carácter direccional de las mediciones.

El resto de las cantidades o variables en las ecuaciones de Maxwell corresponden a las propiedades de los materiales, las cuales no pueden determinarse directamente sino a través de la forma en que responden a excitaciones externas. Generalmente, estas propiedades se determinan en el laboratorio para muestras de rocas mediante relaciones sencillas entre la intensidad de la fuente y los campos resultantes. En el caso que nos ocupa, esta relación es más bien remota, ya que tanto la fuente como el lugar de la medición están bastante alejadas de la región donde se origina la respuesta. Las relaciones entre propiedades y mediciones son bastante complicadas, y generalmente requieren de tratamientos especiales si es que hemos de poder estimar dichas propiedades a través de las mediciones. Este aspecto del problema, conocido como el problema inverso, será tratado en el próximo número.