

IMÁGENES ELECTROMAGNÉTICAS DEL INTERIOR DE LA TIERRA: PARTE II

Enrique Gómez Treviño
CICESE, Ensenada, Baja California, México

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

Parte II.

Esta segunda parte está dedicada a explicar los fenómenos naturales así como los medios artificiales que permiten que fluya corriente eléctrica en el interior de la Tierra. Como vimos en el número anterior, nos interesa poder estimar la conductividad eléctrica de los diferentes materiales del subsuelo. Debido a que esta propiedad se define en términos de la capacidad que tiene un material dado para conducir la corriente eléctrica, es imprescindible que nos planteemos el problema de cómo hacer para que fluya corriente eléctrica a grandes profundidades.

3. ILUMINANDO EL SUBSUELO

En la primera parte de este trabajo establecimos un paralelo entre el fenómeno de la visión y la utilización de métodos electromagnéticos para obtener imágenes del subsuelo. Aunque la analogía entre ambos procesos no es completa, la seguiremos utilizando pues es más rica de lo que hasta ahora se ha mencionado. Consideremos con más detalle el caso de la visión: para poder ver un objeto es necesario que exista una fuente de luz; el Sol es una fuente natural y las linternas de mano son fuentes artificiales. De la misma manera, para obtener imágenes del subsuelo se pueden utilizar fuentes naturales o artificiales. En el caso de la visión, el objeto iluminado refleja o dispersa la luz de la fuente de acuerdo con sus características particulares, en el caso de los métodos geofísicos que nos ocupan, es necesario inducir corriente eléctrica en el subsuelo y la distribución de la corriente en el interior de la Tierra dependerá de su composición y estructura. En ambos casos se requiere iluminar la región de interés con el fin identificarla, lo que dependerá de la respuesta a la iluminación. En el primer caso, la respuesta se percibe a través de los ojos, mientras que en el segundo, mediante dispositivos diseñados para tal efecto. En un número posterior trataremos la parte de la percepción o medición de la respuesta de la Tierra a la iluminación. En el presente número consideraremos solamente la parte correspondiente a la iluminación y describiremos el uso de fuentes naturales y artificiales.

3.1 FUENTES NATURALES

Todos sabemos que es el Sol la fuente natural de luz más importante para nuestra visión. Desafortunadamente, las radiaciones electromagnéticas que conforman la luz no penetran en la Tierra mas allá de unos pocos milímetros, por lo que no se ajustan a nuestros propósitos. La longitud de onda de estas radiaciones es tan pequeña que ni siquiera llega a alcanzar un

milímetro. La historia es similar para el caso de las ondas de calor que nos llegan del Sol, las cuales también son radiaciones electromagnéticas. Para investigar el interior de la Tierra necesitamos radiaciones cuya longitud de onda varíe desde alrededor de un metro hasta cientos de kilómetros. Desafortunadamente, el Sol no emite radiaciones importantes en estas longitudes de onda. Sin embargo, por una coincidencia bastante fortuita, resulta que es al Sol, a nuestro viejo amigo el Sol, a quien debemos la fuente natural más importante para iluminar el interior de la Tierra. Ésto se debe a una serie de fenómenos cuya combinación produce las radiaciones que necesitamos. El Sol emite partículas cargadas como protones y electrones que, aunque raras veces llegan a la superficie de la Tierra, son capaces de generar ondas electromagnéticas al quedar atrapadas a gran altura sobre ésta. El campo magnético terrestre captura a estas partículas y las mueve de tal forma que se producen corrientes eléctricas fluctuantes en las altas capas de la atmósfera. Estas corrientes actúan como antenas transmisoras de ondas electromagnéticas que penetran en el subsuelo hasta grandes profundidades. Los geofísicos captan en la superficie los efectos de estas corrientes y, después de procesar e interpretar sus mediciones, obtienen imágenes de las profundidades. En un número posterior veremos la naturaleza de estos efectos y como se miden, así como lo que hay que considerar para convertir las mediciones en imágenes.

El método electromagnético más conocido que utiliza fuentes naturales es el magnetotélúrico. Siguiendo con nuestra analogía con el fenómeno de la visión, el uso del método magnetotélúrico corresponde a ver a plena luz del día. Los métodos que utilizan fuentes artificiales, según veremos más adelante, corresponden a ver de noche con la ayuda de bombillas eléctricas o linternas de mano. Lo anterior no significa que es preferible ver de día que de noche. Todo depende de que es lo que se quiere ver. Hay cosas que se ven mejor de noche con iluminación especial, así también, de noche podemos iluminar sólo lo que quiere ver, y eliminar efectos perturbadores de objetos sin interés. Así sucede con los métodos electromagnéticos, en algunos casos funcionan unos mejor que otros. En el caso del método magnetotélúrico, su principal ventaja es que no es necesario producir artificialmente corrientes en el subsuelo, ya que se basa en la existencia de corrientes que circulan naturalmente por toda la Tierra. Estas corrientes se producen por las mencionadas radiaciones que provienen de las altas capas de la atmósfera; contribuyen también los rayos o descargas eléctricas entre las nubes y la superficie terrestre.

Según lo anterior, la naturaleza hace circular en el interior de la Tierra corrientes eléctricas que pueden utilizarse para obtener imágenes del subsuelo. La profundidad de penetración

está controlada exclusivamente por el periodo de alternancia de las corrientes. Junto con la circulación de corriente alterna en la tierra ocurre un fenómeno disipativo que limita la profundidad de penetración. El efecto es tal que la profundidad de penetración aumenta al aumentar el periodo de oscilación de la corriente. Esta propiedad se aprovecha para controlar en el proceso de interpretación de la profundidad de penetración de las mediciones. Normalmente se realizan mediciones a periodos que van desde una centésima de segundo hasta centenares de segundos. Sin embargo, si se quiere obtener información a centenares de kilómetros de profundidad, se requieren mediciones con periodos de muchos días. A la fecha, el método magnetotélúrico es el único que permite obtener información sobre la conductividad de la tierra más allá de los mil kilómetros de profundidad.

3.2 FUENTE ARTIFICIALES

Por diversas razones, en muchos casos resulta mas conveniente iluminar solamente la región de interés, sobretodo para evitar los efectos perturbadores de áreas circunvecinas o de regiones que, aunque alejadas de los puntos de interés, por su tamaño o propiedades eléctricas producen efectos indeseables en las mediciones. En estos casos se recurre al uso de fuentes artificiales para inducir corrientes en el subsuelo. Generalmente se explota el principio de inducción electromagnética descubierto por Faraday a mediados del siglo XIX. Este principio se puede ilustrar considerando lo que comúnmente se conoce como métodos electromagnéticos en el dominio del tiempo. Si un cable conductor como el de las conexiones domésticas se conecta a una pila, se establece una corriente continua que genera un campo magnético estático a su alrededor. Ésto se puede comprobar fácilmente con el uso de una brújula pues el campo magnético se extiende tanto en el aire como en la Tierra. El circuito no induce corrientes eléctricas en conductores vecinos mientras la pila se mantenga conectada. Ésto lo comprobó Faraday muy a su pesar, pues esperaba que tal fenómeno existiese. Esto es, que un campo magnético estático produjera un campo eléctrico. Lo que finalmente descubrió fue que era necesario desconectar la pila para que se produjeran corrientes en conductores vecinos. Después de desconectada la pila todo volvía a la normalidad: las corrientes inducidas también desaparecían. Dicho de otra forma, resultaba posible inducir corrientes en conductores vecinos a través del aire o del vacío, pero solamente a condición de variar la corriente en el circuito emisor. En el ejemplo citado la variación en el tiempo se da en el momento de desconectar la pila. Sin embargo, el mismo fenómeno se puede producir haciendo que por la espira circule corriente alterna, ya que también ocurre que su campo magnético varía en el tiempo. Los métodos que utilizan corriente alterna se conocen como métodos electromagnéticos en el dominio de las frecuencias. En general, ya sea en el dominio del tiempo o en el de las frecuencias, la corriente eléctrica que circula en el subsuelo evita las zonas de baja conductividad y tiende a concentrarse en las altamente conductoras. En la práctica se suelen utilizar espiras de entre un metro y un kilómetro de diámetro, dependiendo del tipo de aplicación. En los métodos

aéreos, por ejemplo, las espiras por lo regular son pequeñas y están formadas por un gran número de vueltas para aumentar su área efectiva.

Como en el caso de las fuentes naturales, la circulación de corriente alterna en la Tierra trae aparejado un fenómeno disipativo que limita la profundidad de penetración. El efecto es tal que la profundidad de penetración aumenta al aumentar el periodo de oscilación de la corriente. En el presente caso también se aprovecha esta propiedad para controlar la profundidad de penetración. La situación ahora es un tanto más complicada, pues la profundidad de penetración depende también de la separación entre la espira que produce el campo magnético y el dispositivo de medición. En los métodos del dominio del tiempo, el lapso transcurrido desde que se desconecta la corriente en la espira juega el papel del periodo. Ésto significa que a medida que transcurre el tiempo la corriente en la Tierra alcanza mayores profundidades. Típicamente, las mediciones se realizan desde tiempos tan cortos como una milésima de segundo hasta uno o varios segundos. En el dominio de las frecuencias normalmente se seleccionan periodos dentro de este mismo margen.

Pasemos ahora a lo que sin duda es la manera mas sencilla de hacer que circule corriente en la Tierra. El método consiste en utilizar una pila eléctrica y conectar sus polos a varillas metálicas clavadas en el suelo. La corriente se dirigirá del polo positivo de la pila a través del cable de conexión, hacia la varilla correspondiente. De la varilla pasará a la Tierra, dispersándose en todas las direcciones, menos hacia arriba, pues el aire es un aislante. En su camino hacia el polo negativo, la corriente encontrará rocas con diferente conductividad eléctrica. Tratará de evitar aquellas que tengan valores pequeños de conductividad y tenderá a concentrarse en las altamente conductoras. Este procedimiento es uno de los más utilizados actualmente, además de ser el más antiguo y sencillo. En la práctica se utilizan separaciones múltiples entre varillas que van desde unos pocos metros hasta centenares de kilómetros en algunos casos, aunque normalmente la máxima separación no es mayor a uno o dos kilómetros. La separación máxima se determina con base en la profundidad que se desea alcanzar, lográndose mayor profundidad de penetración aumentando la separación entre los puntos de inyección. También, dependiendo de la separación y de la conductividad eléctrica del terreno, se llegan a inyectar a la Tierra desde unos cuantos miliAmperios hasta decenas de Amperios, con voltajes máximos entre las varillas de corriente de hasta 3,000 voltios. En muchos equipos comerciales se sustituye la corriente continua por corriente alterna de baja frecuencia. Generalmente las mediciones resultan idénticas a las de corriente continua, ya que el fenómeno de inducción electromagnética es muy débil en la mayor parte de los casos. Sin embargo, es importante tomar precauciones al respecto, sobre todo en terrenos muy conductores y cuando se utilizan separaciones muy grandes.

Este procedimiento para obtener información sobre las propiedades eléctricas del subsuelo surgió a principios de siglo en Francia, como una solución a una necesidad eminentemente

práctica relacionada con la búsqueda de minerales metálicos. Una vez planteado el problema y concebida la idea de su solución, bastaron unos cuantos cálculos y algunas pruebas de campo, junto con mediciones a escala en el laboratorio, para que Conrado Schulumberger, el inventor del procedimiento, inaugurara una serie de desarrollos y problemas relacionados con la elaboración de imágenes eléctricas del subsuelo. A pesar del tiempo transcurrido, quedan algunas cuestiones importantes por resolver, sobre todo las relacionadas con los aspectos matemáticos de la formación de imágenes en medios tridimensionales. Algo se ha logrado en los últimos años pero falta mucho por hacer.

En el presente número hemos considerado el problema de cómo hacer para que circule corriente eléctrica en el subsuelo.

Resulta relativamente fácil medir la conductividad eléctrica de una muestra de roca en el laboratorio; aunque hay que tomar muchas precauciones para hacerlo correctamente, hay que tomar en cuenta que se trabaja directamente con la muestra, por lo que hacerle pasar una corriente no representa mayor dificultad, o por lo menos el tipo de dificultad es diferente al caso de las rocas que se encuentran a grandes profundidades. Éste es precisamente el caso que nos ocupa. Nuestro problema consiste en obtener imágenes del subsuelo mediante la medición a distancia de la distribución de conductividad eléctrica. Resulta pues imprescindible que seamos capaces, desde la superficie de la Tierra, de hacer que circule corriente eléctrica a grandes profundidades y después resolver el problema de cómo captar en la superficie misma los efectos de tales corrientes. Ésto lo veremos en el próximo número.