

IMÁGENES ELECTROMAGNÉTICAS DEL INTERIOR DE LA TIERRA: PARTE 1

Enrique Gómez Treviño
CICESE, Ensenada, Baja California

1. INTRODUCCIÓN

Como seres que vivimos en la superficie de la tierra podemos dirigir nuestra vista en diversas direcciones. Hacia arriba y hacia los lados podemos distinguir objetos que se encuentran a muchos kilómetros de distancia; tal es el caso de las montañas lejanas, la luna o el sol. De todos nuestros sentidos, el de la vista es el que posee mayor campo de acción: éste va desde nuestra nariz hasta las estrellas. Aunque generalmente no pensemos en ello, no deja de ser gratificante sabernos poseedores de tan fantástico poder. Sin embargo, más bien escogemos pensar que nuestros sentidos son bastante limitados, y en particular el de la vista. Lo anterior se debe a que comparamos la capacidad de nuestros ojos con lo que puede hacer un microscopio o un telescopio. La resolución de estos instrumentos es simplemente muy superior a la de nuestros ojos. Llegaremos a una conclusión similar si comparamos nuestra visión con lo que se puede lograr mediante el uso de rayos X. En este caso no se trata de un simple cambio de escala. Mediante el uso de rayos X se puede ver el interior de los objetos, lo cual es cualitativamente diferente de un simple agrandamiento o acercamiento de las imágenes.

Esta capacidad para ver el interior de un objeto es un logro relativamente reciente. Mucho antes de alcanzarlo ya habíamos explorado gran parte del mundo microscópico, y antes de esto ya conocíamos el gran poder del telescopio. Sin embargo, podemos afirmar que la fantasía de ver a través de los obstáculos es anterior al deseo de ver objetos muy pequeños o muy lejanos. Por ejemplo, en el caso de objetos muy pequeños ni siquiera sospechábamos la existencia de los microbios, nadie imaginaba que tal mundo pudiera existir. Por otro lado, la capacidad de traspasar la materia con la vista ha sido contemplada por la humanidad desde hace muchos siglos, y todavía se sigue contemplando. Desde los antiguos dioses griegos hasta el moderno superman han poseído este poder. Estos seres extraordinarios están dotados, o mas bien los hemos dotado, de poderes también extraordinarios que no poseemos los seres que somos simplemente humanos. Freud nos diría que los individuos siempre han tenido deseos inconscientes de ver a través de las paredes, y que ante la imposibilidad de satisfacer estos deseos, superan sus frustraciones inventando personajes fantásticos que todo lo pueden. Por su parte, Platón explicaría que en tiempos muy antiguos los hombres eran capaces de ver a voluntad a través de los obstáculos, pero que los dioses, seguramente celosos por alguna travesura indiscreta de los humanos, habían determinado quitarles este poder. De cualquier manera que sea, el hecho es que ver a través de

los obstáculos es un logro que hemos ido perfeccionando con el tiempo. Existen muchas formas de hacerlo dependiendo del obstáculo y de lo que se esté buscando. Algunas técnicas se utilizan en el cuerpo humano para inspeccionar los órganos internos. Los aeropuertos cuentan cada vez con más y mejores sistemas de seguridad, para lo cual requieren de técnicas para identificar lo que contienen las maletas, por supuesto que sin abrirlas. Por otra parte, en la exploración del subsuelo se utilizan técnicas para localizar diversos recursos naturales.

Históricamente el subsuelo ha sido un misterio en el cual tan pronto imaginábamos monstruos peligrosísimos como riquezas incalculables. Ambas visiones son parcialmente ciertas, considerando el origen interno de las erupciones volcánicas y de los terremotos, así como que de las entrañas de la tierra extraemos desde piedras preciosas hasta petróleo, pasando por vapor de agua y gran parte del agua potable que consumimos. Para entender las erupciones volcánicas y los terremotos, y para localizar los yacimientos de petróleo y de minerales, es necesario construir imágenes o modelos del interior de la tierra. Y en esto es en donde esta el problema que nos ocupa. La tierra es opaca, en el sentido en que no deja pasar la luz. La luz que llega a la tierra se refleja o se absorbe, dando como resultado el que no podamos observar directamente lo que se encuentra en su interior. Tan sólo un centímetro de tierra puede ocultarle a un arqueólogo el gran descubrimiento de su vida. Y tan sólo un centímetro de tierra puede ocultarle también a un buscador de tesoros la fortuna de él y sus descendientes.

Se puede apreciar que existen muchas y muy diversas razones para que dediquemos tiempo y esfuerzo a la solución del problema que nos ocupa. Mucho se ha logrado sobre todo en el presente siglo. En un estudio sismológico reciente se descubrió que el núcleo interno de la tierra, el cual se encuentra a varios miles de km de profundidad, está girando un poco mas rápido que el resto de la tierra. La diferencia es tan pequeña que se necesitan 400 años para que el núcleo supere en una vuelta completa al resto de la tierra. Sin embargo, la diferencia es suficientemente grande para tener importantes implicaciones en el comportamiento del campo magnético terrestre. Paralelamente a la adquisición de conocimientos del interior de la tierra, hemos ido desarrollando diversas formas para obtener imágenes de las profundidades. Aunque estas imágenes son aún un tanto borrosas debido a la dificultad del problema, lo que hemos logrado es bastante y satisface mucha de nuestra curiosidad, además de que nos ha servido para localizar y explotar una variedad de recursos naturales en que se basa nuestra civilización material. Platón podría reconfortarnos diciendo que al perder nuestros poderes

de antaño, ganamos la gloria de reconquistarlos por nosotros mismos.

El presente escrito pretende servir como una pequeña introducción a una de las formas más usuales para obtener imágenes del subsuelo. En conjunto se trata de una variedad de métodos todos ellos basados en los principios físicos del electromagnetismo. Recordando que la luz es también un fenómeno electromagnético, aunque de diferente escala, los métodos y procedimientos que se describirán pueden muy bien considerarse como la extensión natural de nuestro sentido de la vista.

2. ¿PORQUÉ IMÁGENES ELECTROMAGNÉTICAS?

Antes de proceder a la respuesta de esta pregunta es conveniente precisar el término "imágenes electromagnéticas del subsuelo", en relación con tipos de imágenes más familiares para el lector. Una fotografía, por ejemplo, contiene simplemente la imagen externa del objeto fotografiado. Una placa de rayos X, por otro lado, puede contener información sobre las partes internas del cuerpo humano, para lo cual se hacen pasar los rayos X a través del cuerpo; una fotografía tomada a través de un telescopio podrá contener detalles imposibles de observar a simple vista sobre la superficie del planeta Júpiter. Lo mismo podría decirse de la imagen de una bacteria vista a través de un microscopio. En todos los casos se trata de imágenes que se obtienen con la ayuda de dispositivos físicos diseñados específicamente para alcanzar el fin que se desea. En todos estos casos se trata también de imágenes electromagnéticas, en el sentido en que la luz y los rayos X son fenómenos de este tipo.

La cámara fotográfica, el aparato de rayos X, el telescopio o el microscopio no pueden utilizarse para obtener imágenes del subsuelo porque ni la luz ni los rayos X penetran lo suficiente en los materiales de que se compone la tierra. Lo mismo pasa con las diferentes cámaras que se instalan en los satélites para fotografiar la tierra. Las imágenes de satélite son muy útiles para identificar las rocas que se encuentran en la superficie, pero no contienen información sobre las rocas que yacen a profundidad. Para obtener información sobre la naturaleza de las rocas y el estado de las mismas a grandes profundidades, se ha diseñado y se sigue perfeccionando una variedad de métodos basados en diferentes principios físicos. Estos métodos genéricamente se les conoce con el nombre de métodos geofísicos, dada la relación que se da entre la geología y la física en el cumplimiento del objetivo. La motivación principal para desarrollar estos métodos es poder obtener imágenes desde pocos metros de profundidad hasta el mismo centro de la tierra, el cual se encuentra a poco más de 6,000 km de la superficie del suelo. Dependiendo del principio físico, estas imágenes pueden corresponder a la distribución de propiedades físicas como la densidad de masa, velocidad de

ondas sísmicas, conductividad eléctrica, conductividad térmica, etc., las cuales para ser útiles deben necesariamente traducirse a imágenes que reflejen el tipo de roca, su temperatura, grado de humedad, porosidad, permeabilidad hidráulica, etc. Las imágenes profundas son útiles para entender la dinámica de la tierra como planeta, así como para explicar fenómenos como los terremotos y las erupciones volcánicas, ya que estos no son sino la manifestación superficial de cambios que se operan en la tierra a grandes profundidades. Las imágenes menos profundas, hasta profundidades máximas de 10 km, resultan útiles en relación con la exploración de los recursos naturales del subsuelo. Con ellas se puede determinar los lugares con mejores posibilidades para la explotación de petróleo, agua o minerales en general.

De las diversas propiedades físicas que se utilizan actualmente para obtener imágenes del subsuelo, en el presente capítulo consideraremos sólo la conductividad eléctrica. Esta propiedad caracteriza el grado que poseen las diferentes rocas para conducir la corriente eléctrica. En un extremo se encuentran las que son aislantes, siendo prácticamente imposible hacer que circule corriente a través de su estructura; el cuarzo a temperatura ambiente es un ejemplo. En la categoría intermedia se encuentran las rocas cuya conductividad se debe a la existencia de electrolitos en poros y fracturas. Las rocas sedimentarias y la mayor parte de las ígneas y metamórficas pertenecen a esta categoría. En el otro extremo se hallan los metales y las rocas con alto contenido de minerales metálicos, así como cualquier tipo de roca a su temperatura de fusión; la corriente eléctrica en estas rocas fluye fácilmente a la menor excitación. Aplicando un voltaje fijo, digamos el voltaje de 1.5 V que proporcionan las pilas común y corrientes, a las rocas que dejan pasar mucha corriente se les asigna un valor alto de conductividad, y viceversa. Las unidades de conductividad son Siemens por metro (S/m).

La relevancia de la conductividad eléctrica en relación con los materiales terrestres se debe principalmente a dos razones: la primera es que con sólo conocer el valor de la conductividad de una roca se puede inferir, con cierto grado de certidumbre, el tipo de roca de que se trate. Como la conductividad de las rocas depende también de otros factores como la temperatura, el contenido de agua, la salinidad del agua, la porosidad, la permeabilidad hidráulica, etc., existe también la posibilidad de hacer inferencias acerca de estos parámetros con sólo conocer el valor de la conductividad. Seguramente el lector tendrá sus experiencias al respecto, en el dado caso de haber recibido pequeñas descargas eléctricas al tocar una pared húmeda cerca de un apagador o toma de corriente. Las paredes secas son muy malos conductores de la electricidad por lo que en condiciones normales no se recibirá ninguna descarga al apoyarse en ellas. Con la humedad las paredes se convierten en buenos conductores, por lo que resulta peligroso tocarlas cerca de instalaciones eléctricas.

La segunda razón de la relevancia de la conductividad eléctrica en relación con los materiales terrestres, es que su valor numérico se puede inferir a distancia, sin que se requiera realizar perforaciones para tener acceso directo a los materiales en cuestión. En esto se basa precisamente la elaboración de las imágenes electromagnéticas del subsuelo, las cuales han de obtenerse trabajando solamente sobre la superficie de la tierra. Para esto se requiere de una fuente de energía capaz de hacer que fluya corriente eléctrica en la tierra, así como realizar mediciones de sus efectos en la superficie. Además, se requiere tratar matemáticamente a las mediciones, considerando para ello las correspondientes leyes físicas que gobiernan el flujo de corriente en la tierra. En las siguientes secciones se describirán las diferentes partes del proceso. Se tratará de evitar en lo posible el uso de recursos matemáticos complicados, se apelará más bien a la intuición y al sentido común del lector mediante argumentos físicos sencillos.

Antes de terminar es conveniente enfatizar que las imágenes eléctricas del subsuelo son más bien medios que fines. Más que la distribución de la conductividad eléctrica

nos interesa su traducción en términos geológicos. Esto es, lo que en última instancia se requiere es la distribución de los diferentes tipos de rocas y las condiciones en que éstas se encuentran. Generalmente este es el aspecto más delicado de todo el proceso, pues no siempre es posible asignar unívocamente un valor de conductividad a un determinado tipo de roca. La experiencia y el conocimiento derivado de mediciones de laboratorio juegan un papel decisivo en esta etapa. El proceso completo desde la toma de mediciones hasta la interpretación final constituye el campo de estudio de los métodos electromagnéticos en geofísica.

En el próximo número trataremos el problema de cómo hacer que la corriente eléctrica fluya a grandes profundidades. En otro posterior seguiremos con la cuestión de cómo detectar en la superficie de la tierra los efectos de esas corrientes. Después veremos el problema de qué hacer con las mediciones para transformarlas en imágenes del subsuelo. En la última parte veremos ejemplos ilustrativos de imágenes de diferentes escalas, desde las más someras para localizar cavidades en el subsuelo, hasta las más profundas para estudiar discontinuidades en el manto de la tierra.