

IMÁGENES ELECTROMAGNÉTICAS DEL INTERIOR DE LA TIERRA: PARTE IV

Enrique Gómez Treviño
CICESE, Ensenada, Baja California, México

Parte I: Geos, 1996, Vol. 16, No. 3, 152-154.

Parte II: Geos, 1997, Vol. 17, No. 2, 104-106.

Parte III: Geos, 1997, Vol. 17, No. 3, 172-176.

Parte IV.

Precisamos en la primera parte de este artículo que llamaríamos *imagen electromagnética* del interior de la Tierra, a una representación de la distribución de la conductividad eléctrica a profundidades desde unos cuantos metros hasta centenares de kilómetros. En la segunda parte explicamos que para estimar esta propiedad a profundidad se requiere hacer que fluya corriente eléctrica a las zonas de interés, y cómo y mediante qué procedimientos podemos lograrlo. Además de hacer que fluyan corrientes eléctricas a profundidad, se requiere detectar desde la superficie los efectos de estas corrientes. Las mediciones, según vimos en la tercera parte, no son ni más ni menos que la materia prima con la que se construyen las imágenes. Por otro lado, en cualquier proceso resulta extremadamente importante saber cómo trabajar la materia prima para lograr el producto deseado. Este es el tema de la presente sección.

Empezaremos por considerar las características y propiedades de la materia prima. Necesitamos analizar y llegar a comprender las posibilidades que tienen las mediciones en relación con nuestro objetivo. En otras palabras: ¿Qué nos puede ofrecer cada una de estas mediciones?. Haciendo una analogía entre la construcción de un edificio y la construcción de una imagen de conductividad eléctrica, la cuestión podría plantearse en términos de las dimensiones de los diferentes elementos que se requieren para lograr un determinado diseño del edificio. En estos términos: ¿habrá que recortar los ladrillos y las vigas para alcanzar el objetivo deseado?, o ¿es que las mediciones representan ya por sí mismas los elementos universales que se acomodan a cualquier diseño? Nada podemos decir al respecto ya que no sabemos lo que las mediciones significan. Solamente analizando los factores que afectan a cada tipo de medición y seleccionando aquellos que nos puedan ser de utilidad, es que podremos decidir cómo y de qué manera habrá que utilizarlos para construir las tan anunciadas imágenes electromagnéticas del interior de la Tierra.

7. ¿QUÉ ES UNA MEDICIÓN?

Ya vimos en la parte III lo que es una medición. Sin embargo, reflexionando un poco sobre la pregunta llegaremos a la conclusión de que ésta puede tener una infinidad de respuestas. La más simple y posiblemente la más natural, podría ser que una medición es simplemente lo que se mide. Por

ejemplo, en el caso de los métodos de corriente directa, lo que se mide es un voltaje o una diferencia de potencial entre un par de electrodos. La respuesta podría ser simplemente el valor de esta cantidad, digamos 15.4 mV. Esta sería una manera correcta de responder a la pregunta. Sin embargo, nosotros estamos tras la pista de qué es lo que significa una medición, dicho de otro modo, ¿qué representa el valor de 15.4 mV?. Es necesario, si queremos llegar a comprender que es una medición, que hagamos una búsqueda exhaustiva de los factores que influyen para que una medición tome un determinado valor. También tenemos que hacer un trabajo de evaluación, con el fin de descartar o neutralizar aquellos factores que, si bien influyen en las mediciones, no nos ofrecen información alguna sobre el subsuelo. Para este análisis seguiremos utilizando el ejemplo de la medida de 15.4 mV.

7.1 MEDICIONES DE RESISTIVIDAD

Los métodos geoelectrónicos que utilizan corriente continua se conocen generalmente como métodos de resistividad. Aparentemente son bastante simples. Sin embargo, una vez considerados con detalle, resultan muy interesantes y ofrecen muchos retos a nuestra comprensión. Supongamos que los 15.4 mV se midieron con un voltímetro cuya impedancia de entrada es de 100 Megaohmios y que la medición corresponde a una separación de 2 m entre electrodos. Los electrodos son varillas de acero de 1 cm de diámetro y 1 m de longitud y están enterradas 20 cm. El voltímetro está conectado a las varillas mediante cables de cobre del No. 14, los cuales terminan en pinzas metálicas de resorte para facilitar su fijación a las varillas. Generalmente las mediciones se realizan a diferentes separaciones, por lo que lo más práctico es utilizar un solo cable con la suficiente longitud para que sirva en todos los casos. Típicamente, parte del cable está enrollado en un carrete o está tendido irregularmente en el suelo. Esto completa la descripción del circuito de medición. Su función es medir el voltaje asociado con la circulación de corriente en otro circuito. El segundo circuito está formado como sigue: una batería de pilas eléctricas que proporciona un total de 90 V está conectada a otras dos varillas, las cuales están en línea con las anteriores, pero separadas ahora 100 m una de la otra. Como en el circuito de medición, las varillas están clavadas 20 cm y están conectadas a la batería mediante el mismo tipo de cable. Adicionalmente, entre la batería y uno de los cables se encuentra conectado en serie un amperímetro para medir la intensidad de la corriente. El amperímetro marca 200 mA.

El párrafo anterior describe lo que típicamente constituye una medición en el método de resistividad. Antes de proceder al análisis de los diferentes factores que afectan propiamente a una medición, conviene representar tan claramente como

podamos el fenómeno que queremos estudiar. Al fluir corriente eléctrica por el circuito que está conectado a la batería, los electrones salen del polo negativo de la batería y viajan por el cable de cobre hasta llegar a la varilla, donde la corriente se expande un poco debido al mayor diámetro de la varilla. Al pasar a la tierra el campo está libre y ya no hay restricciones de espacio, por lo que la corriente se expande en todas direcciones, excepto hacia la atmósfera, pues el aire es muy resistivo comparado con la tierra. Hay que recordar que al pasar de la varilla a la tierra, la corriente cambia de naturaleza: los portadores de carga, de ser electrones en los cables y las varillas, pasan a ser iones en la tierra. Si bien este es un punto fundamental del fenómeno de conducción eléctrica, el comportamiento macroscópico de la corriente es idéntico en ambos casos. Se sabe por experiencia que los dos tipos de flujo se gobiernan con las mismas leyes, por lo que podemos dejar este punto de lado.

Lo que ahora interesa es que al llegar a la tierra la corriente está libre para esparcirse, y lo hace hacia abajo y horizontalmente, sin tener una dirección preferencial si el terreno es homogéneo. Las fuerzas de la gravedad son muchas veces más pequeñas que las eléctricas, por lo que no son un factor importante que pueda influir en la dirección de la corriente. Lo que sin duda deberá influir es la distribución de conductividad en la tierra. Por ejemplo, si a un lado de la varilla se encuentra una caverna vacía, la corriente por supuesto que no podrá atravesarla, le dará la vuelta y la corriente que debió haber pasado por el espacio que ocupa la caverna, tenderá a concentrarse a lo largo de sus bordes.

Otro factor que obviamente influye en la dirección de la corriente es la posición de la segunda varilla conectada a la batería. Toda la corriente que sale de la primera deberá regresar necesariamente a la segunda. Se podría pensar que esto de que la corriente regrese a la otra varilla es teóricamente posible, pero no ocurre en la práctica. Inhomogeneidades tales como fallas y fracturas y la presencia de variaciones en la composición química del suelo representan obstáculos para los iones en su viaje de una a otra varilla. Sin embargo, a pesar de todo esto se debe tener en cuenta que la corriente simplemente está circulando, y que la cantidad de carga que sale de una varilla debe necesariamente entrar por la otra. En este caso se trata de la ley de la conservación de la carga, la cual inicialmente fue sugerida por simple sentido común y después comprobada experimentalmente. Actualmente, esta ley se puede derivar por deducción partiendo de las ecuaciones de Maxwell. Para aquellos lectores con orientación matemática, lo anterior se expresa estableciendo que la divergencia de la densidad de corriente es nula en cualquier punto del espacio. De hecho, la mayor parte de los aspectos matemáticos de los métodos de corriente directa, se basan en la correspondiente ecuación diferencial que resulta de considerar que la carga eléctrica se conserva. Además se tiene que en la tierra existen tanto iones positivos como negativos. Físicamente lo que sucede es que los iones positivos se dirigen a la varilla de polaridad negativa, y viceversa. Sin embargo, el efecto neto es equivalente a

considerar iones de un solo signo, por lo que podemos imaginar que la corriente simplemente sale de una de las varillas y necesariamente deberá de terminar en la otra. La corriente que sale de la varilla positiva en dirección de la negativa seguirá a grandes rasgos la misma dirección hasta completar el circuito. Por otro lado, la corriente que sale en la dirección opuesta tendrá eventualmente que cambiar de dirección para finalmente completar el circuito.

Para completar la discusión anterior sobre la ley de la conservación de la carga, conviene precisar que estamos considerando el caso estacionario, en el cual la corriente no varía con el tiempo. Cuando decimos que la corriente entra a la tierra por una de las varillas y sale por la otra, nos referimos al estado estacionario en que la corriente está simplemente circulando sin existir variaciones en el tiempo. Desde el momento de la conexión, el sistema debe pasar por una etapa transitoria que, en la mayor parte de los casos dura mucho menos que un segundo. En aras de la exactitud en la descripción, es necesario hablar un poco sobre este último efecto, considerando que la corriente no puede establecerse inmediatamente después de la conexión debido a las leyes del electromagnetismo.

Veamos las cosas por partes. Antes de efectuarse la conexión no existe flujo de corriente eléctrica, por lo que tampoco existe campo magnético alguno en la vecindad de los cables ni dentro de la tierra. Cuando ya se ha establecido el régimen estacionario existirá un campo magnético asociado con el flujo de corriente en los cables, así como con el flujo de corriente en la tierra. Tenemos entonces que las condiciones cambian de una situación en la que no existe campo magnético, a una en la que el campo está presente. Este tipo de cambios está gobernado por la ley de Faraday. Sucede que el cambio no puede darse de inmediato debido a que en la tierra se generan corrientes transitorias que se oponen a que tal cambio se lleve a cabo. La duración de estas corrientes es mayor cuanto más conductora sea la tierra. De hecho, este fenómeno es la base para un tipo especial de métodos en geofísica conocidos como métodos electromagnéticos en el dominio del tiempo. Ya hemos hablado un poco sobre ellos y los volveremos a tocar en este escrito. Por ahora es suficiente estar conscientes de que este efecto existe también en el presente caso de corriente directa, pero que simplemente se ignora y más bien se trata de evitar su influencia en las mediciones.

Otro efecto que coexiste con el anterior, aunque no siempre está presente, es el de polarización inducida. Este se presenta cuando en la tierra existe cierto tipo de minerales metálicos en los que la conducción es electrónica, como en los cables de cobre. La conductividad eléctrica de la tierra se debe a la presencia de electrolitos, o sea, sales y otros compuestos químicos naturales que al encontrarse en presencia de humedad se separan en iones positivos y negativos. Estos iones son los que forman la corriente eléctrica en la tierra. ¿Qué sucede cuando estos iones, en su viaje por el subsuelo, se topan con las partículas metálicas en las que la conducción es mediante electrones que pueden moverse en su interior? ¿Pueden los iones penetrar en las partículas metálicas y así continuar su camino?

La respuesta es no. Lo que sucede es que se acumulan iones de signos opuestos de un lado y otro de la partícula metálica, a la vez que se concentran electrones de un lado y disminuyen en el lado opuesto en el interior de la partícula. La polarización de cargas alrededor del mineral existirá mientras exista el flujo de corriente. Al dejar de fluir la corriente, las cargas volverán a su lugar, lo cual tomará un tiempo determinado. De manera similar, para que llegue a formarse la polarización alrededor de la partícula, se requerirá cierto tiempo. Como se mencionó anteriormente, este fenómeno recibe el nombre de polarización inducida, pues se refiere a la polarización de las cargas alrededor de la partícula, y es inducida pues se establece por medio de la influencia de una corriente externa. En contraste, la polarización espontánea produce lo que se conoce como potencial espontáneo, cuyo origen se debe a reacciones naturales de oxidación-reducción y a otros efectos relativamente poco estudiados. El efecto de polarización inducida puede durar más de un segundo cuando existen determinados minerales metálicos. De hecho, este fenómeno se aprovecha en la búsqueda de varios tipos de minerales. Aunque en menor medida el efecto también existe cuando hay abundancia de arcillas.

En lo que concierne a los métodos de corriente continua, los efectos transitorios debidos a inducción electromagnética y a polarización inducida, aunque bastante importantes ya que han dado lugar a métodos geoeléctricos independientes, no representan sino ruido y deben eliminarse o neutralizarse en la medida de lo posible.

7.1.1 Planteamiento del problema

Llegamos entonces al siguiente cuadro o representación de nuestro experimento, que consiste en una batería conectada a dos cables, que a su vez están conectados a dos varillas clavadas en el suelo. Por el circuito fluye una corriente de 200 mA, que viaja por los cables cuyo diámetro es milimétrico y al llegar a la tierra se expande y se distribuye acomodándose a las condiciones locales del terreno. Tenemos además un circuito de medición que consiste de un voltímetro conectado a dos cables que a su vez están conectados a otras dos varillas clavadas en el suelo. El voltímetro indica 15.4 mV. La pregunta es: ¿cómo depende esta cifra de 15.4 mV de los parámetros del experimento? Deseamos saber cuáles de ellos son irrelevantes y cuáles sí son verdaderamente importantes para nuestro objetivo. Nuestro objetivo sigue siendo el mismo pues queremos saber qué nos indica el valor de 15.4 mV sobre la distribución de conductividad en el subsuelo.

Tenemos muchos parámetros que debemos analizar muy cuidadosamente. En el circuito de emisión tenemos el voltaje de la batería, el radio y la longitud de los cables, las dimensiones de las varillas y la distancia que las separa, la longitud de la parte enterrada de las varillas y, finalmente, la distribución de conductividad en el subsuelo. Por otro lado, en el circuito de medición tenemos la impedancia del voltímetro, el radio y la longitud de los cables, la curva que definen los cables en el suelo, las dimensiones de las varillas y la distancia que las separa,

la longitud de la parte enterrada de las varillas y, por supuesto, la distribución de conductividad en el subsuelo. Es cierto que son demasiados los aspectos que hay que considerar, sin embargo, algunos de ellos pueden ser completamente irrelevantes. Hay otros que son altamente significativos para el valor particular de 15.4 mV, pero su efecto real en términos de información es nulo, por lo que su contribución a la medición deberá neutralizarse. Sólo uno de los aspectos será verdaderamente significativo y no puede ni debe neutralizarse. Se trata por supuesto de la distribución de conductividad en el subsuelo. Siendo así las cosas uno se pregunta: ¿cómo es que a final de cuentas todo saldrá precisamente como lo deseábamos? Sobre este punto hay que recordar que estamos describiendo un método que ha sido diseñado precisamente para que las cosas sucedan de esta manera.

7.1.2 Análisis del circuito de emisión

Empecemos por considerar el efecto que tiene el voltaje de la batería. Como en todo circuito eléctrico compuesto por elementos resistivos, la función de la batería es proveer continuamente de energía al circuito para mantener constante el flujo de corriente. Esta energía se transforma continuamente en calor en los elementos del circuito. En nuestro caso, esto quiere decir que los cables, las varillas, la batería y hasta la tierra misma se calientan cuando se hace fluir la corriente. En la mayor parte de las aplicaciones, este calentamiento es imperceptible, pero bien puede apreciarse cuando el producto de la corriente por el voltaje resulta considerable. Si bien este calentamiento está presente durante todo el levantamiento de resistividad, el efecto en los diferentes elementos del circuito, incluyendo a la tierra, es generalmente tan pequeño que podemos considerar que las propiedades de los diferentes materiales no cambian a pesar de los cambios de temperatura. Podemos suponer que la resistencia de los diferentes elementos del circuito no cambian. Si tuviéramos que tomar en cuenta posibles cambios en este sentido, el problema se complicaría terriblemente. De hecho, en los casos en que tales cambios son significativos, lo que se hace es compensar automáticamente las variaciones en el circuito emisor para que el que interpreta las mediciones ni siquiera se moleste para tomarlas en cuenta.

El único aspecto pasivo que hay que considerar para el análisis del circuito emisor es la resistencia total del mismo. La corriente que se establece en el circuito se puede conocer de antemano si se conoce el voltaje de la batería y la resistencia total. Según la ley de Ohm, la relación entre la intensidad de la corriente (I), el voltaje de la batería (V) y la resistencia del circuito R , se expresa: $I = V/R$. Para calcular R debemos sumar las resistencias de los diferentes elementos que se encuentran conectados en serie con la batería. Estos son, la batería misma, los cables, las varillas y la tierra. La resistencia de los primeros tres es muy pequeña comparada con la de la tierra, por lo que la intensidad de la corriente será simplemente el voltaje de la batería dividido por la resistencia de la tierra.

La ley de Ohm no es una ley fundamental de la naturaleza que deba cumplirse en todas las circunstancias. De hecho, no

se cumple en todos los materiales y deja de cumplirse en general cuando la corriente o el voltaje toman valores muy altos. Volviendo a nuestro problema, ¿se cumplirá en la tierra la ley de Ohm? Esta es una pregunta muy válida ya que no se trata de un material simple como el cobre, sino de una mezcla muy heterogénea de materiales en las más diversas condiciones. Para comprobar que la cumple podemos hacer un experimento muy sencillo. Se pueden fácilmente seleccionar diferentes voltajes como 15, 30, 60 y 90 V en la batería. Al aplicar estos voltajes también se producirán en el circuito diferentes corrientes. Dividiendo los voltajes entre las correspondientes intensidades de corriente deberemos obtener siempre el mismo valor, independientemente de qué valor de voltaje se utilizó. La razón es la resistencia de la tierra, ya que $R=V/I$.

Recordemos que la resistencia que ofrece un material de forma cilíndrica, como lo es un alambre de cobre, es directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional a su área transversal. Esto confirma nuestro sentido común de que la resistencia será proporcionalmente mayor al tener que recorrer una mayor distancia, y que entre más área tenga la corriente para esparcirse menor será la resistencia ofrecida por el medio. Lo más característico de la tierra es que el área disponible para que circule la corriente es extremadamente grande, al grado que podría considerarse infinita. Consecuentemente, su resistencia tendría que ser muy pequeña. Sin embargo, lo que se observa es que su resistencia es, en general, tan grande que podemos despreciar la resistencia de todos los demás elementos del circuito de emisión. La razón de esta aparente paradoja es que si bien la corriente en la tierra tiene bastante libertad para esparcirse, esta libertad está muy restringida cerca de las varillas. La corriente deberá pasar en la tierra por un área igual a la que presenta la parte enterrada de la varilla. A pesar de que la varilla tiene una área equivalente, su resistencia es muy pequeña debido a que su resistividad es también muy pequeña, no así la de la tierra, que por lo menos es varios órdenes de magnitud mayor que la del acero. Esto significa que la resistencia que opone la tierra al paso de la corriente se concentra principalmente cerca de las varillas. Ya lejos de las varillas la corriente se distribuye en áreas cada vez más grandes por lo que la contribución de estas regiones a la resistencia total es muy pequeña.

El hecho de que la resistencia total del circuito de emisión dependa casi enteramente de la resistividad del terreno que se encuentra en contacto con las varillas tiene una aplicación práctica muy importante. Cuando esta resistencia es muy grande y no se puede inyectar suficiente corriente porque el voltaje disponible no lo permite, la única posibilidad es disminuir la resistencia del circuito. Esto se logra disminuyendo la resistividad del terreno que se encuentra en contacto con las varillas, de donde proviene el nombre de resistencia de contacto, para lo cual simplemente se riegan las varillas. El terreno que las rodea al humedecerse por lo general disminuye su resistividad varias veces con respecto a su valor original, por lo que con el mismo voltaje se puede conseguir una corriente varias veces mayor. Sin embargo, hay que pensar en el efecto que tal

modificación pueda tener en el circuito de medición, pues estamos modificando la distribución de conductividad del terreno. Al regar las varillas lo primero que observaremos es que en el circuito de medición aumenta el voltaje que registra el voltímetro. Si la corriente aumenta de 200 a 400 mA, observaremos que nuestro valor original de 15.4 mV pasa a 30.8 mV. El efecto principal es simplemente escalar el valor original según el aumento de la corriente. Las modificaciones cerca de las varillas de corriente afectan muy poco a la distribución general de la corriente en la tierra. Para las varillas del circuito de medición, las cuales se encuentran relativamente lejos de donde se hicieron las modificaciones, la corriente sigue saliendo prácticamente del mismo lugar. El efecto es equivalente a utilizar varillas más gruesas y lo mismo se puede decir acerca del efecto de la longitud de la parte enterrada de las varillas. Si se clavan un poco más o un poco menos, la resistencia cambiará y por lo tanto variará la corriente que puede inyectarse con un voltaje determinado. Sin embargo, el efecto en la medición será proporcional a la nueva intensidad de corriente.

Todo lo anterior nos indica que ni el voltaje de la batería ni la intensidad de la corriente que circula por el circuito de emisión son parámetros importantes. Podemos decir que el menos importante de los dos es el voltaje de la batería, puesto que podemos obtener la misma lectura en el circuito de medición, independientemente del valor del voltaje de las baterías. No se puede decir lo mismo de la intensidad de la corriente, la cual resulta siempre proporcional al valor de la medición. Sin embargo, el hecho de que exista esta proporcionalidad indica que no se trata de un parámetro que nos proporcione información sobre la distribución de conductividad del terreno. Para eliminarlo o neutralizarlo, lo cual resulta conveniente, podemos simplemente dividir el valor de la medición entre el de la corriente. De esta manera, nuestra medición representará un valor de voltaje por unidad de intensidad de corriente y el valor resultante será equivalente a haber realizado la medición cuando la intensidad de la corriente es de 1 A. Aquí es interesante hacer la observación de que el mero hecho de que exista esta proporcionalidad indica que la ley de Ohm se cumple en cada rincón de la tierra por donde circula la corriente. Si no fuera así, el valor de la medición aumentaría de otra manera al aumentar la intensidad de la corriente, ya que al variar la distribución en el subsuelo de alguna manera alteraría el valor de la medición. Esto quiere decir que con aumentar la intensidad de la corriente en el circuito de medición, estamos aumentando la densidad de corriente en todos los puntos en el subsuelo, pero de una manera proporcional. De ninguna forma, al aumentar la intensidad de la corriente se penetra más en el subsuelo. Es cierto que circulará más corriente por debajo de cierta profundidad, pero también circulará más corriente por encima de esa profundidad, de manera que la distribución relativa siempre es la misma. En resumen, podemos decir que, si bien todos y cada uno de los elementos del circuito de emisión son necesarios para inyectar corriente en la tierra, prácticamente ninguno influye de una manera importante en el circuito de medición.

Vimos que el valor del voltaje de las baterías es irrelevante, que las varillas pueden enterrarse una mayor o menor longitud en la tierra sin que se altere prácticamente la medición, que la resistencias de la batería, los cables y las varillas, son despreciables en comparación con la resistencia de contacto, y que ésta es la que en última instancia determina la intensidad de la corriente que se inyecta a la tierra. También vimos que el valor de la intensidad de corriente es en sí mismo irrelevante, y que aunque la intensidad tiene un efecto directo en las mediciones, tal efecto puede fácilmente neutralizarse sin que con ello se pierda información. Sólo nos queda analizar el efecto de la distancia entre las varillas. Esto lo veremos más adelante después de considerar a continuación los detalles del circuito de medición.

7.1.3 Análisis del circuito de medición

En el ejemplo que estamos considerando el circuito de medición consiste en un voltímetro de 100 Mohmios de impedancia interna y cables No. 14 para conectar las varillas de acero, las cuales tienen un metro de longitud y están separadas 2 m. Las varillas están clavadas 20 cm en el suelo. El problema consiste en determinar cuánto y de qué manera influyen las cantidades anteriores en el valor de 15.4 mV. Veamos primero el papel que juega la impedancia o resistencia interna de 100 Mohmios del voltímetro. Para esto es conveniente recordar que lo que un voltímetro hace es simplemente responder a una excitación eléctrica externa, que en este caso está representada por el flujo de corriente en la tierra. Una porción de esta corriente se desvía por los cables y fluye a través de una resistencia en el voltímetro. La medición de voltaje de 15.4 mV representa el producto de la resistencia interna del voltímetro y la cantidad de corriente que ha sido desviada de la tierra. Esta corriente deberá ser extremadamente pequeña con el fin de que en la tierra el flujo no se vea perturbado de manera significativa. Necesitamos examinar el flujo en la tierra como si el circuito de medición no estuviera presente. Por esta razón la resistencia interna del voltímetro debe ser muy grande y mientras más grande, mejor. Otra razón igualmente importante para exigir que la resistencia sea muy grande, es que ésta debe ser mucho mayor que la suma de todas las demás resistencias del circuito de medición. Lo anterior se debe a que el voltaje se obtiene internamente en el voltímetro como el producto de la corriente que se desvía y la resistencia interna del aparato, lo que supone que no existen otras resistencias a través de las cuales esté fluyendo la corriente. El voltímetro supone que su resistencia interna es el único obstáculo que existe en el circuito. Sin embargo, sabemos que existe también la resistencia de los cables y las varillas así como la de contacto con el suelo. Las primeras dos siempre pueden despreciarse porque se trata de materiales metálicos de muy baja resistividad, especialmente seleccionados para este tipo de aplicaciones, precisamente porque no modifican apreciablemente las propiedades del circuito.

Por otro lado, la resistencia de contacto puede llegar a ser muy grande, pero muy raras veces llega a ser del orden de Mohmios, por lo que una resistencia interna de 100 Mohmios

es suficiente para la mayor parte de las aplicaciones. Las varillas pueden estar más o menos enterradas y la resistencia será igualmente despreciable. En caso de que se intuya o se compruebe la existencia de una resistencia de contacto demasiado grande, se pueden mojar o clavar más las varillas, como en el circuito de emisión. Esto generalmente no modifica en forma substancial el flujo de la corriente y la medición tendrá un valor suficientemente cercano al ideal.

Quedó establecido que los cables no afectan el valor de la medición debido a que poseen resistencias despreciables en comparación con la del voltímetro. Sin embargo, esto no se aplica al efecto que pueda tener la forma particular que tome el cable al estar tendido en el suelo. En una de las secciones anteriores se mencionó que lo que un voltímetro mide es el efecto acumulado de la componente del campo eléctrico tangencial al cable. Si el cable está tendido en el suelo, el campo eléctrico que influye en la medición es el asociado con la parte más superficial del flujo de corriente. De aquí parece desprenderse la conclusión de que debemos de alinear el cable con las varillas si lo que pretendemos es obtener una estimación del campo eléctrico en esa dirección. Si el cable está tendido de cualquier otra forma, estaremos midiendo el campo en lugares que están fuera del espacio entre las varillas. En realidad, es así, por lo que en principio deberíamos tener mucho cuidado en tender el cable en la forma correcta. Sin embargo, lo que permite desobligarnos de este requerimiento es que, si el flujo de corriente no varía con el tiempo (como en el presente caso), el mencionado efecto acumulado es independiente de la forma que tome el cable al estar tendido en el suelo. Esta es la razón por la que en las mediciones de resistividad no se pone atención a la alineación del cable. Matemáticamente esto se expresa diciendo que el campo asociado con el flujo de corriente directa es conservativo o irrotacional.

En conclusión, podemos decir que casi ninguno de los parámetros mencionados anteriormente tiene un efecto significativo en el valor de 15.4 mV que registra el voltímetro. Como en el caso del circuito de emisión, nos queda por analizar el efecto de la separación entre las varillas y, por supuesto, el efecto de la distribución de conductividad en el subsuelo. Antes de pasar a estos temas conviene detenernos un poco y examinar, basándonos en lo que hemos aprendido, la técnica que estamos describiendo para medir la resistividad de la tierra. En particular, cuestionar la necesidad de tantos electrodos o varillas.

7.1.4 Un poco de historia

Hemos planteado que para medir la resistividad de la tierra requerimos de un circuito de emisión y otro de recepción. Este punto es cuestionable. Cuando medimos resistencias en el laboratorio utilizamos un medidor de resistencias, el cual posee dos terminales. A través de estas dos terminales se aplica un voltaje a la resistencia y se mide la corriente que pasa por ella. La resistencia es simplemente el voltaje dividido por la corriente. No se necesitan más de dos terminales. ¿Por qué en nuestro caso necesitamos cuatro? Esta es una pregunta muy válida. A principios de siglo así es como se hacían las cosas. Se realizaban

levantamientos a lo largo de perfiles en los cuales simplemente se medía la resistencia utilizando dos varillas o electrodos. Debemos suponer que a alguien muy desconfiado no le pareció que los resultados fueran de mucha utilidad y se puso a estudiar en detalle lo que en realidad significaban esas mediciones. Lo que notaba en los perfiles era que la resistencia dependía mucho de las condiciones superficiales del suelo. Esto lo llevó a realizar los primeros estudios teóricos sobre la resistencia que ofrecen medios tridimensionales (como la tierra) al flujo de corriente a través de electrodos de diversas formas. Así, se encontró que efectivamente la resistencia de la tierra se concentra alrededor del electrodo, en una región demasiado pequeña para que la medición se vea afectada por zonas profundas de mayor interés. Este fracaso relativo se aprovechó para proponer un dispositivo de cuatro electrodos, el cual estaría a salvo de este problema y tendría más posibilidades de ofrecer información de mayores profundidades.

Para ver que en realidad que esto es así, consideremos el dispositivo particular de los cuatro electrodos que hemos estado analizando. Los de corriente están separados 100 m y los de medición 2 m. Ahora supongamos que vamos separando más y más los de medición, hasta que coinciden con los de corriente. El valor de 15.4 mV de la medición de voltaje se irá incrementando hasta alcanzar 90 V, que es el voltaje entre los electrodos de corriente. Podemos decir entonces que el dispositivo de dos electrodos es simplemente un caso particular del de cuatro. Consideremos además que la tierra es homogénea excepto por la presencia de una caverna que se encuentra en un lugar indeterminado entre los electrodos de corriente. El flujo de corriente en la superficie de la tierra es casi idéntico al que se produciría en una tierra homogénea. La única diferencia es la pequeña perturbación que produce la caverna. En estas condiciones, el problema consiste en determinar con qué tipo de dispositivo resultará más factible detectar la perturbación debida a la caverna. Esta perturbación, independientemente de la localización de la caverna, producirá un efecto equivalente a una pequeña fracción del efecto del flujo normal de corriente. Lo deseable para una mejor detección es estar lo más lejos posible de los electrodos de corriente, ya que el flujo se intensifica cerca de ellos. Entre más cerca estemos de los electrodos de corriente, más pequeña será la fracción que le corresponda a la perturbación. Esto significa que es muy difícil observar la perturbación en un flujo intenso, por lo que es más conveniente alejarse de las varillas de corriente. Colocando las varillas de medición en el centro de las de corriente, estamos alejados lo más posible de la zona donde el flujo es más intenso y entonces el efecto se intensifica. Por el contrario, al ir acercando las varillas de medición a las de corriente, estamos disminuyendo la fracción correspondiente a la perturbación. Al llegar a coincidir en los extremos unas con otras, el efecto es mínimo.

Generalmente se tiene la idea de que el método de resistividad nació como lo conocemos actualmente, esto es, ya perfeccionado y sin problemas de desarrollo, tal y como Palas Atenea nació del cerebro de Zeus, ya crecida y con todo y armadura.

Era lo más natural que el dispositivo de dos electrodos naciera primero como una simple extensión de lo que se hacía en el laboratorio. La inclusión de otros dos electrodos realmente significó un avance al lograr superar las limitaciones en cuanto a la profundidad de penetración.

7.1.5 Análisis conjunto de los dos circuitos

Nos queda por analizar, y posiblemente neutralizar, el efecto de las separaciones entre las varillas. También será conveniente analizar el efecto de la distribución de conductividad, pero en este caso no con el fin de neutralizarlo, sino más bien para tratar de inferir la distribución a partir de las mediciones.

Volviendo al problema de determinar el efecto de la separación entre las varillas, podemos darnos cuenta de que en general el efecto no se puede calcular, y por lo tanto neutralizar, ya que todo dependerá de la distribución de conductividad en el subsuelo. De lo único que podemos estar seguros es de que entre más lejos estemos de las varillas de corriente, más pequeña será la medición que registre el voltímetro, ya que estaremos captando un flujo de corriente cada vez más diluido. También podemos decir que entre más separadas estén las varillas del circuito de medición, mayor será el voltaje que se mida, pues estaremos incrementando la distancia de acumulación para el campo eléctrico. Sin embargo, resulta bastante incómodo analizar valores de voltaje que varían con las separaciones, sobre todo cuando se trabaja con separaciones múltiples. Entonces, es muy conveniente buscar y aplicar algún tipo de normalización que neutralice estos efectos, aunque tal normalización corresponda a un caso particular de flujo. Con esto no estaríamos introduciendo ninguna inexactitud en el método, ya que se trataría de un simple factor que puede volver a tomarse en cuenta a la hora de interpretar las mediciones. Lo que se pretende es eliminar la variación más obvia del flujo de corriente, la que en sí, no contiene perturbaciones. De esta manera, se logrará también resaltar el efecto de posibles perturbaciones, que es lo que nos interesa.

Para encontrar los factores adecuados hay que decidir lo que vamos a considerar como una tierra normal o sin perturbaciones. Por razones de simplicidad se define como normal una tierra homogénea y plana. El modelo corresponde a un semi-espacio homogéneo de resistividad indefinida para el cual se puede calcular con facilidad la distribución de corriente. Idealmente, tendríamos que considerar un semi-espacio homogéneo con topografía irregular para simular los accidentes del terreno. Sin embargo, ello complicaría tremendamente el cálculo de los factores de normalización. Para una tierra plana, la densidad de corriente es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la que se encuentra un electrodo fuente. Este tipo de variación es muy fácil de visualizar. Encienda el foco de su cuarto y aprecie cómo la iluminación en su mano disminuye a medida que se aleja del foco. Esto le dará una idea suficientemente exacta de cómo disminuye la intensidad de la corriente al alejarse de una de las varillas. Considerando un par de electrodos de medición cercanos uno al otro, colocados simétricamente y en línea con

los dos electrodos de corriente (como en el caso que usamos de ejemplo), el voltaje entre los electrodos de medición se calcula con la fórmula $V = (b/(\pi r^2))Ip$, donde b representa la separación entre los electrodos de medición, I es la intensidad de la corriente que se inyecta a la tierra, ρ es la resistividad de la tierra y r es la semi-distancia entre los electrodos de corriente. Podemos ver en esta fórmula que el voltaje es directamente proporcional a la separación entre los electrodos de medición, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los de corriente. El factor completo que se muestra entre los paréntesis indica la forma en que varía el voltaje al variar las separaciones entre las varillas. Este es el factor que estábamos buscando. Si las mediciones de voltaje se normalizan por este factor estaremos compensando o neutralizando el efecto de las separaciones entre las varillas, según uno de nuestros propósitos originales.

Para neutralizar el efecto, dividamos el voltaje entre esta cantidad, y para seguir utilizando la ecuación hagamos lo mismo en el lado derecho según lo indican las reglas del álgebra. Según la fórmula el resultado de la operación es $V(\pi r^2/b) = Ip$. Por otro lado, ya habíamos discutido que la intensidad de la corriente inyectada no es un parámetro que contenga información sobre el subsuelo, y que su efecto puede neutralizarse dividiendo las mediciones de voltaje entre dicha intensidad. Según nuestro análisis de los párrafos anteriores, sólo debe quedar el efecto de la distribución de conductividad, ya que todos los demás parámetros, o bien resultaron completamente irrelevantes, o su efecto fue neutralizado por las respectivas normalizaciones. Normalicemos pues por la intensidad de la corriente y utilicemos la última ecuación para ver a qué es igual nuestra medición dos veces normalizada. La fórmula nos lleva a que $(V/I)(\pi r^2/b) = \rho$. ¡Esto se pone interesante!. En el lado izquierdo tenemos nuestra medición doblemente normalizada, primero por la intensidad de la corriente, y luego por el efecto de las separaciones entre las varillas. Habíamos dicho que la medición original de voltaje era $V = 15.4 \text{ mV}$. Le quitamos el efecto de la intensidad de corriente dividiendo entre $I = 200 \text{ mA}$. El resultado es 0.077 Ohmios . Le quitamos ahora el efecto de las separaciones entre varillas, para lo cual usamos $b = 2 \text{ m}$ y $r = 50 \text{ m}$. El resultado de la doble normalización es 302 y según las reglas de dimensionalidad, sus unidades son Ohmios-m. Ahora bien, según la fórmula derivada anteriormente, este resultado no es otra cosa que la buscada resistividad de la tierra. Si el terreno en donde se tomó la medición es homogéneo, lo anterior se aplica exactamente, pero si no lo es, sólo podemos decir que la resistividad efectiva es de 302 Ohmios-m . No podemos decir nada más. Con una sola medición no podríamos ni siquiera decir si el terreno es o no homogéneo. Necesitaríamos más mediciones para hacer comparaciones.

Lo que hemos hecho en el párrafo anterior no es un simple despeje, o por lo menos ésta no ha sido la intención. Hemos más bien utilizado la ecuación como una herramienta que nos ha ayudado a encontrar el factor que ya estábamos buscando. La necesidad de tal factor fué establecida en el análisis que se hizo de los diferentes efectos que influyen en una medición. Lo mismo con relación a la intensidad de la corriente.

Para completar este análisis, será muy conveniente determinar el volumen de terreno que afecta a una medición particular. Para esto, hay que considerar que las mediciones de voltaje dependen en gran medida de la distribución de la corriente en el subsuelo. ¿Qué tanto se distribuye la corriente a profundidad y hacia los lados?. Sabemos que es muy intensa cerca de las varillas y tiende a disminuir rápidamente al alejarse de ellas. La dependencia con la distancia es tal que, al doblar la distancia, la corriente disminuye no a la mitad sino a la cuarta parte. A pesar de esta fuerte disminución con la distancia, no podemos decir a qué profundidad ya no circula corriente, debido a que la ley de disminución no establece límites precisos. Sin embargo, para ser prácticos, debemos considerar que más allá de cierto valor la distribución de la corriente no afectará de manera significativa a las mediciones.

Para establecer las dimensiones del volumen crítico, podemos considerar la variación de la corriente con la profundidad bajo el punto mismo de medición. De esta manera estaremos tomando en cuenta tanto al circuito de medición, como al de emisión. Los cálculos arrojan una cifra para la profundidad de casi la mitad de la separación entre las varillas de corriente, suponiendo que la profundidad máxima corresponde al lugar donde la corriente decae a un 37 por ciento de su valor en la superficie. El mismo cálculo es aplicable a la distancia crítica hacia ambos lados de la línea. Para acotar la distancia a lo largo de la línea (o sea hacia adelante y hacia atrás de las varillas de corriente), suponemos simplemente que la corriente que circula fuera de la zona definida por las varillas no tiene efecto significativo sobre la medición. Con esto obtenemos un volumen crítico que tiene las siguientes dimensiones: la profundidad es equivalente a la mitad de la separación entre las varillas de corriente; la anchura es la separación entre las mismas varillas; la longitud es la separación misma. En el ejemplo que hemos utilizado, el volumen queda definido como $50 \times 100 \times 100 \text{ m}$, en donde el orden de los factores es profundidad, anchura y longitud. Seguramente el lector estará de acuerdo en que es una verdadera lástima que, precisamente la menor de estas cantidades corresponda a la profundidad. Sin embargo, las cosas son así.

En uno de los próximos números extendaremos este análisis a una tierra heterogénea. Con ello entraremos propiamente en lo que se conoce como teoría de inversión. El próximo número estará dedicado a analizar mediciones asociadas con el flujo de corriente alterna en una tierra homogénea.