

Tema 3: TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

3.1 Introducción.

La Tomografía eléctrica es un método de resistividad multielectródico, basado en la modelización 2-D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas). Destacar que actualmente se está avanzando en la modelización 3-D.

De uso generalizado tanto en Europa como en EE.UU, en la resolución de un amplio abanico de problemas ingenieriles e hidrogeológicos, en España continúa siendo una técnica poco extendida y conocida bajo el nombre genérico de Tomografía eléctrica.

No obstante destacar que en la bibliografía anglosajona (i.e. Dahlin [1]), se distinguen dos nomenclaturas en función de la disposición de los electrodos en el terreno: “Electrical imaging” en el caso que se dispongan en superficie (fig. 1), o “Electrical tomography” si se hallan en el interior de sondeos verticales. (fig. 2).

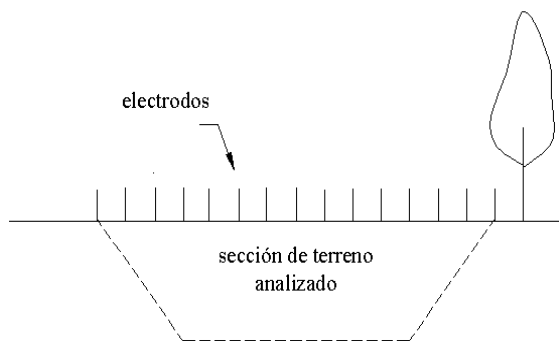


Fig.1 Esquema del “Electrical imaging”.

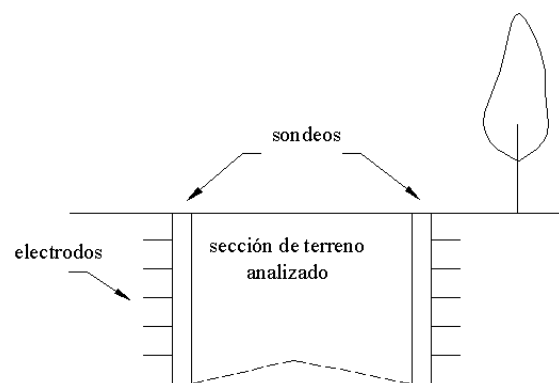


Fig.2 Esquema del “Electrical tomography”.

Si bien a nivel teórico no existen diferencias significativas entre ambas variantes, en esta tesina solo nos centraremos en la descripción del “Electrical imaging”, ya que además de ser la técnica más adecuada para el estudio de problemas de filtración (en donde se precisan perfiles de gran longitud), es también la variante más económica, fácil y rápida de implementar en el campo.

La aparición de la Tomografía eléctrica ha supuesto un salto cualitativo espectacular con respecto a los métodos de resistividad convencionales, técnicas que aunque se han estado utilizando durante varias décadas en estudios de filtración de agua, su limitada resolución 2-D les confería en general un papel secundario frente a otras técnicas (i.e. Potencial espontáneo).

Este avance se debe fundamentalmente a dos razones:

- En primer lugar porque estos métodos convencionales solo utilizan 4 electrodos, siendo necesario para cada medida variar manualmente sus posiciones en el terreno (proceso relativamente lento y pesado). En cambio el método de Tomografía eléctrica es una técnica multielectródica, en el que todo el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado.

Esto nos permitirá poder realizar un gran número de medidas, tanto en profundidad como lateralmente, en un breve espacio de tiempo (del orden de 500 medidas en una hora y media), obteniendo por tanto modelos 2-D de gran resolución.

- En segundo lugar porque el empleo de técnicas numéricas nos permitirá poder procesar eficazmente todo este gran volumen de información.

3.2 Objetivo del método.

El objetivo de este método se basa en obtener una sección 2-D de resistividades reales del subsuelo, modelo a partir del cual podremos determinar la presencia o no de filtraciones de agua en profundidad, mediante la localización de áreas en donde tengamos una disminución anómala del valor de la resistividad del terreno.

Para ello será preciso el empleo de un programa de inversión, con el que transformar las resistividades aparentes obtenidas de la campaña de campo, a valores de resistividad real.

3.3 Principios teóricos básicos.

3.3.1 Esquema básico del funcionamiento del método.

Independientemente de que la Tomografía eléctrica sea una técnica multielectrónica, la base teórica de su funcionamiento es análoga al de los métodos de resistividad convencionales.

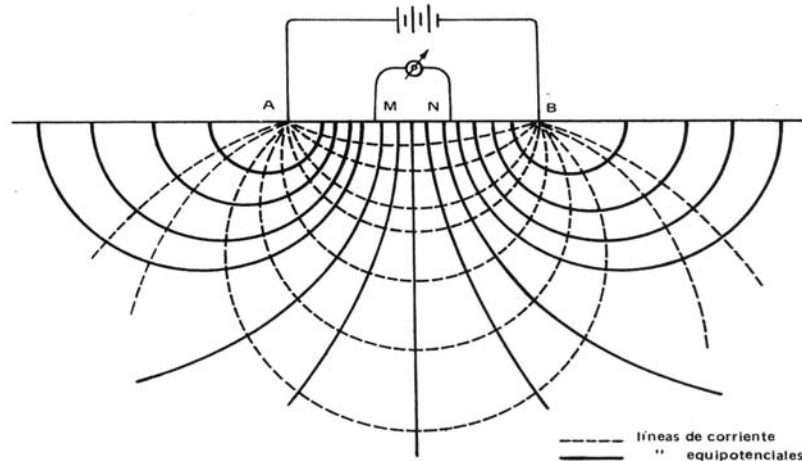


Fig. 3 Esquema básico de los métodos de resistividad (Figueroa [2]).

Los métodos convencionales solo precisan 4 electrodos y se basan en introducir en el terreno, un campo eléctrico de corriente continua mediante dos electrodos de corriente (A,B) conectados a un miliamperímetro, mientras que con los otros dos electrodos (M,N) y que están conectados a un milivoltímetro, mediremos cual es la diferencia de potencial eléctrica ΔV entre esos dos puntos, parámetro a partir del cual podremos calcular el valor de la resistividad (ver 3.3.2) en el punto medio del dispositivo y a una profundidad determinada (ver 3.5.3).

Existen diferentes configuraciones a la hora de colocar los 4 electrodos, siendo las más utilizadas Wenner (la variante α) y Schlumberger. También tenemos la denominada configuración Wenner-Schlumberger (muy utilizada en Tomografía eléctrica).

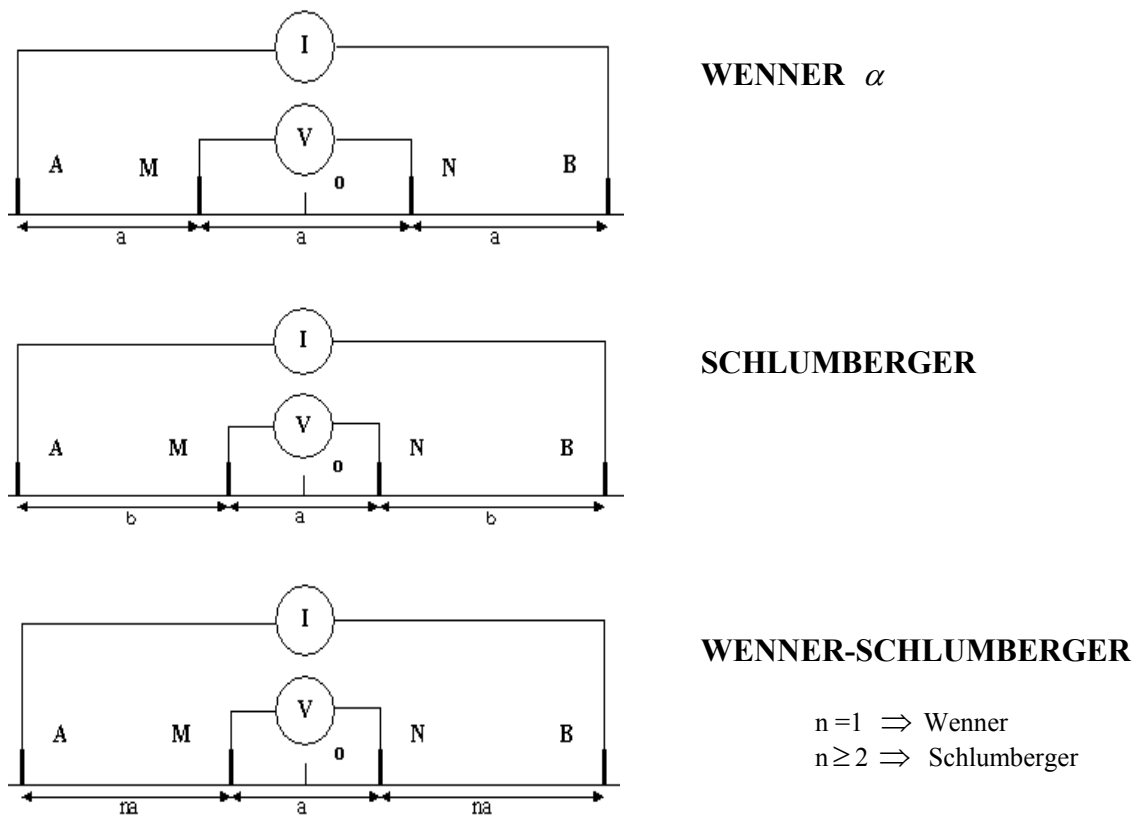


Fig. 4 Esquema de los dispositivos electrónicos más habituales en los métodos de resistividad.

Escogido el dispositivo y realizada la primera medida, si lo que se persigue es medir como varía la resistividad del terreno sobre la vertical del punto medio “o”, iremos expandiendo los electrodos que en el caso de usar el dispositivo Wenner, deberán ser los 4 (para mantener la condición de $AM=MN=NB$), mientras que para Schlumberger (o Wenner-Schlumberger) solo expandiremos los electrodos A y B. Este análisis de la variación vertical del valor de la resistividad es lo que se conoce con el nombre de *sondeo eléctrico vertical “SEV”*.

En cambio si lo que pretendemos es medir la variación lateral de la resistividad del terreno, bastará con mover los 4 electrodos solidariamente (tanto para Wenner como Schlumberger) hacia uno u otro lado. Esto es lo que se conoce como *calicata eléctrica*.

Como se puede apreciar la obtención de las medidas en los métodos convencionales es un proceso significativamente lento y pesado.

Partiendo de estos conceptos básicos, la gran innovación del método de Tomografía eléctrica con respecto a los métodos convencionales, reside en que ahora todas las medidas se realizarán de forma totalmente automatizada, es decir sin necesidad de mover manualmente ningún electrodo. Ello se debe a que por un lado trabajaremos con un gran número de electrodos en el terreno (dispuestos equiespaciadamente), y por otro lado a que nuestro dispositivo de medida de resistividades, se encargará de realizar automáticamente toda la secuencia de medidas preestablecida, formando para ello y según las especificaciones predefinidas, todas las posibles combinaciones de 4 electrodos.

De esta forma se irá obteniendo la variación de resistividad del subsuelo tanto en profundidad como lateralmente. En la figura 5 tenemos un ejemplo de la secuencia de medición utilizando el dispositivo Wenner.

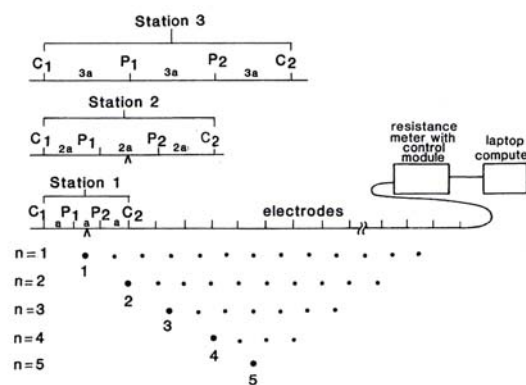


Fig. 5 Secuencia de medidas con dispositivo Wenner (Barker [3]).

3.3.2 La resistividad eléctrica.

Cuando introducimos corriente eléctrica en el terreno, ésta se puede propagar de tres maneras diferentes a través del subsuelo: *conducción dieléctrica* (asociada a materiales muy poco conductivos o aislantes), *conducción electrónica* (asociada a materiales con electrones libres, i.e. los metales) y *conducción electrolítica* (asociada al movimiento de los iones presentes en el fluido intersticial del terreno).

La conducción electrolítica es el modo de propagación más importante, y en el que se basa los métodos de resistividad.

En un semiespacio homogéneo e isótropo de resistividad ρ , y sometido a una intensidad I , el valor del potencial V de un punto situado a una distancia r con respecto a un electrodo puntual es

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad [3.1]$$

Partiendo de la expresión [3.1], para una disposición electródica como la mostrada en la figura 3, el potencial medido por los electrodos de medida M y N será.

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right]; \quad V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right] \quad [3.2]$$

Por lo que la diferencia de potencial ΔV_{MN} entre ambos puntos será

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad [3.3]$$

Si ahora despejamos ρ obtendremos el valor de la resistividad para el punto medio del dispositivo. La resistividad no es más que una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso por un material determinado.

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad [3.4]$$

En donde ρ_a se mide en *Ohmios-metro*, I en *Amperios*, y V en *Voltios*. El término K es el “factor de penetración” o “coeficiente del dispositivo” y dependerá de las distancias entre los electrodos.

$$K = \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]} \quad [3.5]$$

Wenner	$K=2 a$
Schlumberger	$K= ((b+a)2 -a) / a$
Wenner-Schlumberger	$K= \pi n (n+1)a$

Tabla 1 Valores de K para las principales configuraciones electródicas.

Ahora bien la resistividad calculada a través de la expresión [3.4], en general corresponderá a la resistividad aparente del terreno y no a la resistividad real.

Ello se debe a que el subsuelo esta compuesto generalmente por distintos materiales, por lo que el campo eléctrico introducido en el terreno afectará simultáneamente a diversas capas, de forma que la resistividad medida corresponderá a un valor intermedio de todas ellas. Solo para suelos homogéneos o para profundidades de investigación muy superficiales, el valor de resistividad medido coincidirá con el de la resistividad real.

3.3.3 Factores que afectan a la resistividad.

La resistividad eléctrica es un parámetro que varía en función de las características del terreno. Algunos de los factores que lo influncian son (Ward [4]):

- El grado de saturación del terreno.
- La temperatura.
- Porosidad y la forma de los poros.
- La salinidad del fluido.
- El tipo de roca.
- Los procesos geológicos que afectan a los materiales.
- La presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico.

Es precisamente esta estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, lo que permite el utilizar estos métodos de resistividad en la búsqueda de focos de filtración de agua en el subsuelo. En este sentido, incrementos del contenido en agua del terreno provocarán disminuciones de la resistividad.

En lo que concierne a los otros factores, destacar que la salinidad del fluido, la porosidad del terreno, y la temperatura (si bien éste es un factor poco importante), presentan un comportamiento análogo al del grado de humedad. Un caso curioso es el de la sal, ya que ésta se comporta como un excelente aislante en estado seco, mientras que en disolución confiere al terreno una alta conductividad.

Existen algunas fórmulas empíricas en las que se intenta expresar la relación entre la resistividad y algunos de estos factores, como por ejemplo la porosidad o la saturación del terreno. Una de las más conocida y aplicable a acuíferos limpios es la de Archie [5].

$$\rho_r = \frac{a\rho_w}{\phi^m S^n} \quad [3.6]$$

En donde S es el coeficiente de saturación, ρ_w es la resistividad del fluido de los poros, ρ_r es la resistividad del terreno, ϕ la porosidad, $n \approx 2$, $1.4 \leq m \leq 2.20$ es el coeficiente de cimentación y $0.6 \leq a \leq 1$.

En la siguiente figura (Orellana [6]) se exponen algunos de los rangos típicos de resistividad, en donde de forma implícita ya están recogidos la influencia de algunos de los factores anteriormente citados. No obstante destacar que los rangos pueden variar significativamente en función de las características del problema.

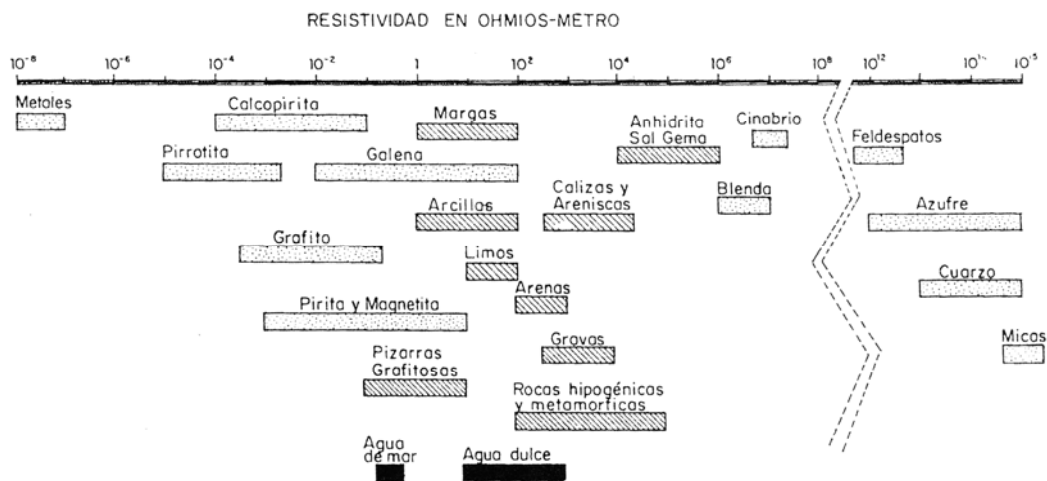


Fig. 6 Rangos típicos de resistividades para rocas y suelos (Orellana [6]).

3.4 Equipo requerido.

El equipo que se precisa para la ejecución del método consta de:

- Electrodos: no son más que unas barras metálicas cuyo número variará en función del problema
- Cable: es de gran longitud, con conexiones cada cierto intervalo a fin de poder conectar los electrodos.
- Conectores: son unos pequeños cables de cobre con pinzas en los extremos. Son los que se encargan de conectar los electrodos al cable.
- Ordenador portátil: en él tenemos el software que nos permite por un lado determinar las variables de trabajo: tipo de dispositivo electrónico, número de electrodos, espaciado entre ellos, número de medidas a realizar, etc., y por otro lado procesar y visualizar los resultados obtenidos.
- Unidad central (resistivímetro): es el cerebro de todo el dispositivo. Se encarga de ejecutar de forma automática toda la secuencia de medidas predeterminada, verificar el buen estado de las conexiones, así como almacenar digitalmente todos los resultados de campo.
- Una batería: es la fuente de alimentación de todo el sistema.

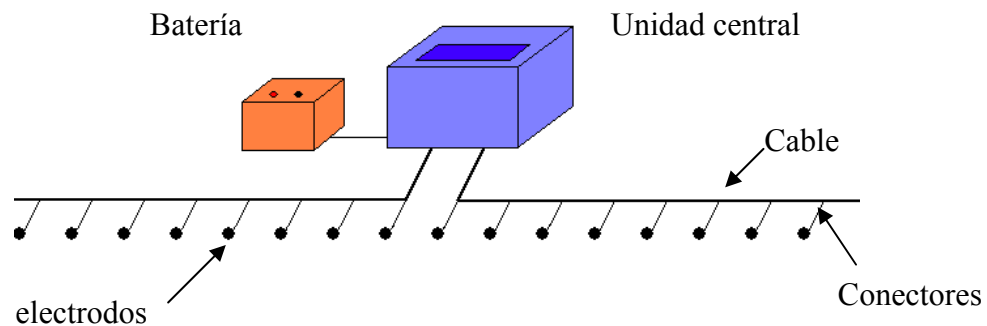


Fig. 7 Esquema del dispositivo requerido en el "Electrical imaging".

En las figuras 8 y 9 se muestran en detalle los elementos que conforman el dispositivo de medida. Corresponden al material utilizado en Cardona, en donde el resistivímetro utilizado es el modelo SYSCAL JUNIOR V.II.2a (de la casa IRIS).



Fig. 8 Detalle del resistivímetro modelo SYSCAL Jr. (derecha) y de la batería (izquierda).



Fig. 9 Detalle de la conexión entre el electrodo y el cable multiconductor.

3.5 Metodología de campo.

3.5.1 Planificación de la campaña de reconocimiento.

Los aspectos más importantes que deberemos definir en la fase de planificación de la campaña de campo son:

- Delimitar los objetivos perseguidos.
- El número de perfiles a realizar y su ubicación.
- Profundidad máxima de investigación.
- El dispositivo electródico, número y separación de los electrodos.
- Medidas preventivas que se deben adoptar para asegurar la calidad de los datos.

El “Electrical imaging” se basa en la obtención de perfiles 2-D de resistividad del terreno (ver fig. 1), por lo en el caso de analizar posibles filtraciones en alguna estructura lineal (i.e. presa), bastará simplemente con disponer el perfil (o perfiles) de electrodos lo más paralelo posible a la traza de la estructura.

En el caso de querer cartografiar en planta las posibles trayectorias del agua, bastará con disponer transversalmente a la traza del flujo diferentes perfiles de electrodos a lo largo de su recorrido, de forma que su correlación nos permitirá establecer una imagen cuasi 3-D del recorrido del agua.

En cuanto al número de electrodos éste es muy variable, si bien un número cercano a 50 electrodos es bastante frecuente. Estos se disponen de forma equidistante oscilando de 1 a 10 m para problemas ingenieriles (Griffiths [7]), si bien para problemas de filtraciones de agua un espaciado entre 1 y 2 metros es lo más aconsejable.

Dos aspectos muy importantes a tener en cuenta, son la profundidad máxima de investigación y el área de definición del método, aspectos ambos estrechamente ligados.

En el “Electrical imaging” el campo de definición disminuye con la profundidad (ver fig. 1). En consecuencia, a la hora de planificar el trabajo de campo hemos de tener presente esta pérdida de definición en los laterales del perfil. En el caso de querer confeccionar un perfil de gran longitud (mediante la unión de varios perfiles individuales), será necesario establecer cierto solape entre perfiles a fin de intentar reducir esta indefinición en los extremos.

En cuanto a la profundidad máxima de investigación, ésta depende esencialmente de la longitud del perfil (a mayor longitud mayor profundidad), si bien el dispositivo electrónico utilizado también influirá en cierta medida (ver 3.5.3).

3.5.2 Colocación del dispositivo y adquisición de los datos.

En primer lugar se procede a colocar los electrodos en superficie de forma equiespaciada, intentando siempre que formen una línea recta. Se deben definir cual es el origen y final del perfil a fin de no tener problemas en la fase de interpretación. Se intentará además que la topografía del terreno sea lo más plana posible para evitar tener fenómenos anómalos en las medidas de resistividad. En el caso que esto sea inevitable, el software permite minimizar este fenómeno mediante el ajuste de la malla.

Los electrodos se clavarán en el terreno lo suficiente como para garantizar un buen contacto electrodo-suelo. Una vez colocados, los conectaremos al cable por medio de los conectores.

Ahora, a través del portátil configuraremos todas las variables del dispositivo: número de electrodos utilizados, distancia entre ellos, dispositivo electrónico de medida, así como el número de medidas que queremos realizar (destacar que podemos suprimir aquellas medidas que creamos oportunas, aspecto que supone un ahorro de tiempo significativo).

Concluida la configuración, se transfieren estas especificaciones a la unidad central para que ésta pueda realizar automáticamente toda la secuencia de mediciones prefijada.

Sin embargo, antes de iniciar las mediciones y también mediante la unidad central, se procede previamente a la verificación de que todas las conexiones funcionan correctamente, y que la resistividad entre electrodo-suelo es suficientemente baja como garantizar unos buenos resultados (en el trabajo práctico se impuso como valor máximo de potencial aceptable 2mV). En el caso de tener valores superiores generalmente basta con clavar un poco más los electrodos, o humedecer el terreno para mejorar la conductividad.

Una vez está todo dispuesto, se inicia la secuencia de medidas que hayamos predeterminado, proceso que tardará más o menos tiempo en función del número de medidas a realizar. En general obtener del orden de 500 medidas comportará un tiempo de cálculo cercano a la hora y media.

Una vez terminado todo el proceso de captura de datos, toda la información almacenada digitalmente se vuelca en el portátil, a fin de proceder a su procesado e interpretación con el programa correspondiente.

3.5.3 Profundidad de investigación.

La profundidad a la que se sitúa cada medida de resistividad es un tema de cierta ambigüedad, dado que ésta no solo depende de la disposición de los electrodos (más espaciados mayor profundidad), sino también de la propia resistividad del terreno.

Como primer paso, se procede a situar cada medida a una profundidad aparente, que corresponde a la profundidad de investigación óptima en el caso de un terreno homogéneo (Edwards [8]). Para Wenner es de $a/2$ siendo a la distancia entre electrodos.

Posteriormente el programa de inversión no solo transformará las resistividades aparentes a reales, sino también situará cada medida a su profundidad real.

En la práctica, y una vez definidos los parámetros de estudio, el software nos permite visualizar la distribución lateral y en profundidad de todas las medidas a lo largo del perfil, de forma que en función de nuestras exigencias, podremos adecuar la profundidad máxima aparente de investigación eliminando los puntos de medida que creamos conveniente.

El dispositivo electródico también influye en la profundidad máxima de investigación. En este sentido con Wenner-Schlumberger se consigue un aumento del 10-15% con respecto al obtenido por Wenner puro.

3.5.4 Procesado de los datos de campo.

Nuestro objetivo es obtener un modelo 2-D de resistividades reales a partir de la pseudosección de resistividades aparentes obtenida del terreno. Para ello se precisará un programa de inversión.

Estas técnicas de inversión se basan en realizar todo un proceso iterativo con el que obtener un modelo de resistividades reales, tal que el modelo de resistividades aparentes que generaría, sea lo más similar posible a la pseudosección de resistividades aparentes medida en el campo.

Las técnicas de inversión que existen hoy en día se puede clasificar en dos grandes grupos (Olayinka [9]):

- 1. Block inversion method**

- 2. Smoothness-constrained inversion method**

Aparte de las cuestiones de implementación y funcionamiento interno, el aspecto diferenciador más significativo entre estos dos métodos de inversión, reside en el tipo de problemas en el que cada una de estas técnicas es más eficiente.

El “**Block inversion method**” ofrece buenos resultados para aquellas situaciones en las que el terreno presente grandes contrastes de resistividades, es decir que tengamos regiones en donde la resistividad sea homogénea en su interior, y a su vez muy diferenciada con respecto a las regiones adyacentes.

Esto lo convierte en un método ideal para la delimitar con bastante precisión la geometría de cuerpos con resistividades muy diferenciadas entre sí (i.e. situar una tubería en un terreno bastante homogéneo). El principal inconveniente reside en la necesidad de introducir un modelo previo, a partir del cual el ordenador procederá a iterar hasta ajustar el modelo calculado al de campo.

No obstante y dado que en problemas de filtración de agua en el subsuelo, las variaciones de resistividad del terreno serán graduales (en especial en los suelos), esta técnica no es eficiente.

El “**Smoothness-constrained inversion method**” (deGroot-Hedin [10]), es en realidad el método de inversión óptimo para el análisis de problemas en donde tengamos variaciones graduales de resistividad en el terreno, como por ejemplo en filtraciones de agua o vertidos de contaminantes. Además este método (basado en el “*Gauss-Newton least-squares method*”), presenta la gran ventaja de que no requiere de un modelo inicial, a partir del cual empezará el proceso iterativo.

Dado su excesivo coste computacional, junto a la poca capacidad de los ordenadores de la época, se desarrolló el método “*Quasi-Newton least-squares*” (Loke and Barker [11]), que es aproximadamente unas 10 veces más rápido que el método convencional, si bien éste precisa que la variación de los valores de resistividad sean más suaves, a fin de poder obtener unos buenos resultados.

Para el trabajo de cardona, el programa de inversión utilizado fue el *RES2DINV* ver. 3.50, software que corresponde a la casa Geotomo Software. En la referencia [12] se puede consultar un manual acerca del funcionamiento del programa, no obstante y a modo de síntesis el esquema básico de funcionamiento es el siguiente:

1. Verificar los datos de campo. El programa permite visualizar las medidas obtenidas a fin de poder eliminar posibles valores erróneos (se distinguen por presentar valores muy diferenciados al de los puntos adyacentes).

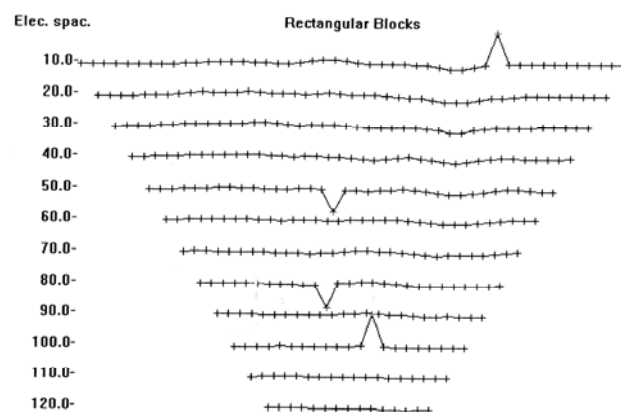


Fig. 10 Detección de puntos atípicos en las medidas de campo.

2. Definir el valor de los parámetros de cálculo necesarios en el proceso de inversión. Los valores con los que trabaja por defecto el programa son satisfactorios en la mayoría de los problemas.

3. Discretización del terreno en bloques (manual o automática). Por defecto el programa trabaja con diferencias finitas, con un número de bloques inferior al de lecturas y cuyo tamaño aumenta un 10% (o 25%) con la profundidad. No obstante podemos modificar manualmente la características de la discretización, así como trabajar con elementos finitos (ideal en el caso de tener topografía irregular)

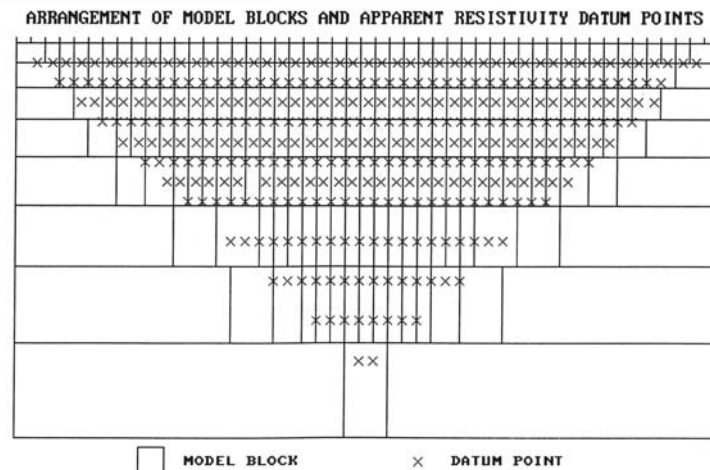


Fig. 11 Discretización del terreno por bloques mediante diferencias finitas.

4. Inicio de los cálculos:

- El programa genera un modelo homogéneo de resistividades.
- Posteriormente calcula el modelo de resistividades aparentes que se deriva del modelo de resistividades reales.
- Compara el modelo aparente calculado con el medido en el campo.
- Comienza un proceso iterativo con el fin de encontrar un modelo de resistividades reales, tal que la diferencia entre el modelo de resistividades aparentes calculado y el medido sea mínimo. El proceso finaliza cuando se alcance un RMS inferior al predefinido. No obstante es frecuente limitar el número de interacciones (por defecto el programa tiene un máximo de 5 iteraciones).
- Visualización de los resultados: pseudosección de resistividades aparentes medida en el campo, modelo de resistividades aparentes calculado por el ordenador y el modelo de resistividades reales.

3.5.5 Interpretación de los resultados.

La detección de filtración de agua en el subsuelo, se basa en localizar disminuciones anómalas del valor de la resistividad en el modelo real.

Sin embargo, que valores de resistividad podemos considerar que son suficientemente bajos como para considerar que puede existir un flujo de agua, dependerá de cada problema en concreto, y en especial de la litología del terreno.

En consecuencia es interesante tener un previo conocimiento de la geología de la zona, ya que de esta forma regiones de similar geología pero con disminuciones de resistividad significativas, podrán ser asociadas como zonas con presencia importante de agua en profundidad.

3.6 Ventajas y limitaciones del método.

Las ventajas que presenta este método son las siguientes:

- Gracias a que el proceso de captura de los datos está totalmente automatizado, podremos realizar un gran número de medidas, de forma que obtendremos secciones 2-D de excepcional resolución tanto en profundidad como lateralmente. Gracias a esta visión bidimensional de alta resolución, el método de Tomografía eléctrica nos permitirá:
 1. Detectar zonas susceptibles de presentar focos de filtración, así como caracterizar geoméricamente el problema (i.e. estimar la profundidad del flujo).
 2. Abordar de forma eficaz problemas en terrenos con elevada complejidad estructural.
 3. Ubicar con gran eficiencia otro tipo de procedimientos (i.e. sondeos o piezómetros), dado que nos marca lugar y profundidad a la que se encuentra la anomalía.
- El procesado de los datos se puede realizar en el propio campo, mediante la ayuda de un portátil y en un tiempo muy reducido. Esta manera de actuar, casi a tiempo real, le confiere al método una gran versatilidad a la hora de resolver posibles problemas surgidos durante todo el proceso de campo, o decidir la ejecución de nuevos perfiles que inicialmente no estaban proyectados

- Podemos controlar la profundidad máxima de estudio.
- Es un método no destructivo.

Las principales limitaciones de este método son:

- Disponer del material requerido. A diferencia de otros métodos, la Tomografía eléctrica precisa de un equipo bastante caro.
- Como pasa en todos los métodos de resistividad eléctrica, la presencia de material muy resistivo en superficie imposibilita un buen funcionamiento del método, siendo necesario la utilización de otras técnicas, en este caso las electromagnéticas, en los que no se precisa un contacto físico con el suelo.