

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

EAP. DE CIENCIAS FÍSICAS

Aplicación de los métodos geoeléctricos en la prospección geofísica

MONOGRAFÍA

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Juan César Toledo Baca

LIMA – PERÚ
2015

RESUMEN

Los métodos de prospección geoeléctrica en corriente continua se fundamentan en la teoría general del campo eléctrico estacionario y se basan en detectar los efectos superficiales que produce el flujo de una corriente eléctrica, natural o inducida, por el subsuelo, son utilizados como práctica común en la investigación de la prospección geofísica, para obtener información de las propiedades del subsuelo. Se han empleado métodos que operan por corriente continua y utilizando un dispositivo de cuatro electrodos (SEV) que se sitúan sobre el terreno en contacto eléctrico con el medio rocoso a estudiar. Respecto al arreglo de electrodos existe una notable variedad de dispositivos de medida, lo cual confiere a este tipo de medidas una gran flexibilidad para investigar variaciones en la distribución de la resistividad del subsuelo. En los últimos años, el surgimiento de nuevas técnicas geofísicas como la tomografía geoeléctrica, especialmente en dos dimensiones (2D), están ayudando a resolver problemas que se presentan con gran frecuencia en la prospección geofísica, como son la caracterización de la contaminación, su evolución temporal y espacial y origen del problema del deterioro de las aguas subterráneas etc.

Agradecimientos

A mi universidad por forjar a los peruanos que día a día hacen denotados esfuerzos por mejora y cambiar nuestro país, pues nos brinda en sus aulas el acogimiento y conocimiento que requerimos para hacer un nuevo Perú, a ella mi mejor agradecimiento a mi facultad porque en ella me he formado y a todos mis profesores y personal administrativo que contribuyeron en mi formación.

Un agradecimiento eterno a mis padres que sembraron en mí el deseo de superación y mejora.

Un agradecimiento al Dr. Jesús Sánchez Ortiz Director Académico de la Facultad de Ciencias Físicas por brindarme su apoyo y consejos.

Al asesor de tesis, Licenciado Moisés H. García Santibáñez por brindarme su apoyo para llevar a cabo este trabajo de graduación con éxito.

La mente que se abre a una nueva idea
jamás volverá a su tamaño original.

Albert Einstein

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN……..1

2. OBJETIVOS……3
2.1. Objetivos generales……3
2.2. Objetivo específico……..3

3. MARCO TEÓRICO……4
3.1. Teoría básica de la resistividad……4
3.2. Fundamento del método……..8
3.3. Prospección Geoeléctrica……10
3.4. Dispositivos Geoeléctricos……11
3.5. Modelización Geoeléctrica del subsuelo……14
3.6. Sondeos de resistividad 1-D……15
3.7. Tipos de arreglos utilizados en el sondeo 1-D……..17
3.7.1. Wenner……17
3.7.2. Dipolo – Dipolo……18
3.7.3. Schlumberger……18
3.8. Sondeos de resistividad 2-D……..19
3.9. Tomografía eléctrica Resistiva (TER)……21

4. METODOLOGIA……..23
4.1. Herramientas y equipos requeridos……25
4.2. Aplicación de la prospección geoeléctrica…..26

5. CONCLUSIONES……..35

6. REFERENCIAS……36

1. INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad el hombre siempre se ha interesado por comprender todos los fenómenos que ocurren en la tierra, surgiendo de esta manera muchas ciencias que se han dedicado a su estudio, entre ellas se encuentran los métodos de prospección instrumentos geofísica para obtener información detallada del subsuelo se hace cada vez más común. La precisión de dichos métodos, permite caracterizar las condiciones del subsuelo, y en muchos casos sin perturbar el sitio o el área de interés. Hoy en día existen métodos e que se han ido desarrollando para esta medición, por ejemplo, causadas por los cambios en las propiedades físicas del subsuelo, ondas electromagnéticas, ondas sísmicas, el magnetismo terrestre, la fuerza de gravedad, etc.

Desde sus inicios los métodos de prospección geofísica han alcanzado grandes éxitos en la búsqueda de yacimientos, efectuando algunos descubrimientos espectaculares de depósitos de minerales, aguas subterránea, estructuras arqueológica entre otros y que gracias a los avances tecnológicos se han perfeccionado y transformado con el fin de lograr un mejor desarrollo y bienestar de la humanidad. No obstante, los métodos de prospección geofísica no siempre son útiles de encontrar directamente los depósitos, sino que su éxito depende de detectar estructuras geológicas que indican la existencia de recursos naturales de gran valor económico. Para esto es necesario de seleccionar el método de prospección que más se adecue al recurso buscado.

En general, al aplicar los conocimientos de prospección geofísica se deben hacer todos los estudios respectivos que aseguren el hallazgo de posibles depósitos, valiéndose para ello de varios métodos geofísicos: magnéticos, gravimétricos, geoeléctrico, tomografía geoeléctrica, electromagnético, sísmico y elmétodo radiométrico, los cuales se aplicaran dependiendo de la sensibilidad del método a las propiedades físicas de roca relacionada con el recurso buscado.

Los primeros intentos de utilización de los métodos geoeléctricos datan desde Robert W. Fox en 1830, quien observó corrientes eléctricas fluyendo en las minas de cobre en Cornish, resultado de las reacciones químicas dentro de las vetas de los depósitos.

A principio de 1882, Carl Barus condujo experimentos en Comstock Lode, Nevada, que lo convencieron de que este método podía ser usado para la búsqueda de sulfato de oro oculto.Fred H. Brown en la era de 1883 a 1891, Alfred

Williams y Leo Daft en 1897, hicieron el primer intento en determinar la diferencia en la resistividad de la Tierra asociada con los depósitos de oro, le fueron otorgadas patentes por esos métodos. La primera aproximación práctica de los métodos eléctricos, donde la tierra es estimulada por una fuente controlada y son medidos los potenciales artificiales que resultan fue hecha por Schlumberger en 1912. En esa época élintrodujo los métodos de líneas equipotenciales de corriente directa.

El concepto de resistividad aparente se introdujo alrededor de 1915, por dos personas principalmente, Wenner en 1912 del U. S. Bureau of Standards y por Schlumberger en 1920. Las técnicas de campo fueron desarrolladas por O. H. Gish y W. J. Rooney del Carnegie Institution of Washington y por Marcel Schlumberger, E. G. Leonardon, E. P. Poldini y H.g. Doll del grupo Schlumberger. Wenner utilizó un arreglo de electrodos equiespaciados (el cual aún lleva su nombre), mientras que el grupo Schlumberger estandarizó una configuración en que los electrodos de potencial están muy pegados, y la medida de campo eléctrico es hecha en la mitad de la distancia de los electrodos de corriente (llamado arreglo Schlumberger).

En los últimos 20 años han aparecidonuevos métodos geofísicos de alta resolución bien adaptados para suministrar información precisa sobre la profundidad, espesor y continuidad lateral de las capas del subsuelo, dando lugar a una nueva disciplina conocida con el nombre de “Near Surface Geophysics”. Para este tipo de estudios es especialmente efectiva la técnica geoeléctrica denominada tomografía eléctrica, que puede considerarse como fruto de la evolución de los métodos geoeléctricos clásicos, como el SEV y la calicata eléctrica.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Los métodos geoeléctrico tienen por objetivo de determinar el valor de la resistividad aparente del subsuelo en el ámbito comprendido entre los sondeos eléctricos (SEV) y hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida, a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua. El proceso de toma de datos consiste en la implantación de numerosos electrodos a lo largo del perfil de medida, con una separación determinada que vendrá condicionada por el grado de resolución que se necesite y la profundidad de investigación que se precise. Con todos los electrodos conectados al Telurometro y mediante un programa secuencial específico que se crea para cada objetivo, el equipo "ordena" cuáles deben ser los conjuntos de electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición.

2.2. Objetivos específicos

* Determinar la profundidad a la que se encuentra el posible acuífero de estudio.
* Determinar las características resistivas de los diferentes estratos que se encuentransobre el acuífero y a partir de ello identificar de ser posible la litología probable que se encuentra sobre o alrededor del acuífero.
* Utilizar un programa especializado de cómputo para analizar e interpretar los resultadosde resistividad aparente medidos en el campo.
* Detección de contactos entre unidades litológicas de diferente naturaleza, determinando la morfología y localización precisa de tales discontinuidades.
* Detección y caracterización de cavidades y huecos, tales como accidentes, depósitos, rellenos arcillosos, etc.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Teoría básica de la resistividad

Considerando un flujo continuo de corriente (DC) en un medio isotrópico y Homogéneo (este análisis aplica también a corrientes alternas (AC) con Frecuencias muy bajas), donde por lo general las propiedades magnéticas pueden ser ignoradas, entonces las ecuaciones de Maxwell se reducen a:

$$\nabla \cdot \bar{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} q \,. \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \bar{E} = 0 \,. \quad (3.2)$$

Donde Ees el vector de campo eléctrico en V/m, $\varepsilon_\circ$ es la Permitividad en el Espacio libre ($\varepsilon_\circ \sim 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m) y q es la densidad de carga en C/m³.

Las técnicas geofísicas generalmente tienen que repartirse en distribuciones 3D de las propiedades físicas. Por lo tanto las siguientes derivaciones son dadas en las tres dimensiones espaciales x, y, z. Aunque las ecuaciones sólo son aplicables para el flujo de corriente continua, ellas pueden ser usadas para representar los efectos de corrientes alternas (AC) de bajas frecuencias, talesque las corrientes de desplazamiento y los efectos de inducción puedan ser despreciados. El campo electrostático puede ser descrito por el gradiente del potencial eléctrico U:

$$\bar{E} = -\nabla U \,. \quad (3.3)$$

Combinando las ecuaciones 3.1 y 3.3, obtenemos la ecuación fundamental de Poisson para campos electrostáticos:

$$\nabla^2 U(x,y,z) = -\frac{1}{\varepsilon_0} q(x,y,z). \quad (3.4)$$

La ecuación de continuidad para un punto en un espacio 3D definido por la función delta de Dirac es:

$$\nabla \cdot \bar{j}(x,y,z) = -\frac{\partial q(x,y,z,t)}{\partial t} \partial(x)\partial(y)\partial(z). \quad (3.5)$$

Donde j es el vector densidad de corriente y t es el tiempo. Junto con la ecuación 3.3 y la ley de Ohm:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \bar{E} = \frac{\bar{E}}{\rho}, \quad (3.6)$$

La ecuación 3.5 puede ser acomodada de la siguiente forma,

$$-\nabla \cdot [\sigma(x,y,z)\nabla U(x,y,z)] = \frac{\delta q(x,y,z,t)}{\delta t} \delta(x-x_s)\delta(y-y_s)\delta(z-z_s). \quad (3.7)$$

Donde x_s, y_s, z_s, define el punto de origen de la carga de prueba. El término origen en la ecuación 3.7 puede ser reescrita en una forma más práctica considerando el volumen elemental ΔV sobre una carga introducida es:

$$\frac{\delta q(x,y,z,t)}{\delta t} \delta(x-x_s)\delta(y-y_s)\delta(z-z_s) = \frac{I}{\Delta V} \delta(x-x_s)\delta(y-y_s)\delta(z-z_s). \quad (3.8)$$

Donde, I es la corriente dada por el punto de origen, la cual es una buena aproximación de situaciones de campo reales, donde usualmente se usa una vara de metal para inyectar la corriente. Sustituyendo la ecuación 3.8 en la 3.7. Obtenemos una ecuación diferencia parcial para el potencial eléctrico en un medio 3D isotrópico no uniforme generado por una carga puntual:

$$-\nabla\cdot[\sigma(x,y,z)\nabla U(x,y,z)]=\frac{I}{\Delta V}\delta(x-x_s)\delta(y-y_s)\delta(z-z_s). \quad (3.9)$$

La solución de esta ecuación puede ser utilizada para modelar la distribución del potencial dentro de un conductor arbitrario en la mitad del espacio.

Para un medio homogéneo e isotrópico, el campo eléctrico debido a una carga puntual puede ser derivado analíticamente. Integrando la ecuación de continuidad 3.5 sobre el volumen y aplicando el teorema de divergencia de Gauss, resulta una integral de superficie de la densidad de corriente j. Sustituyendo j de la ley de Ohm en 3.6 e integrando sobre la superficie de una esfera con radio r produce:

$$E(r)=\frac{I\rho}{4\pi r^2}. \quad (3.10)$$

De la cual es fácil demostrar que:

$$U(r)=\frac{I\rho}{4\pi r}. \quad (3.11)$$

La ecuación 3.11 describe el potencial debido a una carga puntual dentro de un espacio homogéneo a una distancia r del punto de inyección de corriente. Las técnicas de resistividad usan generalmente electrodos desplegados sobre la superficie. Para estos casos, la ecuación 3.10 que ha sido integrada sobre una superficie esférica produce:

$$U(r)=\frac{I\rho}{2\pi r}, \quad (3.12)$$

Debido a que sólo es la mitad del espacio.

Para permitir que la corriente fluya a través de un medio conductor, podría colocarse, de forma teórica, el otro electrodo de corriente en el infinito. Para la

determinación de las superficies de resistividades se necesita conocer la distribución del potencial y la corriente suministrada (ver la ecuación 3.11). Dados dos electrodos de corriente A y B como en la figura 1 y aplicando la ecuación 3.12, el potencial para un punto cualquiera M es:

$$U_M = \frac{I\rho}{2\pi}\left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right], \quad (3.13)$$

Donde r_1 es la distancia entre M y A y r_2 es la distancia entre M y B.

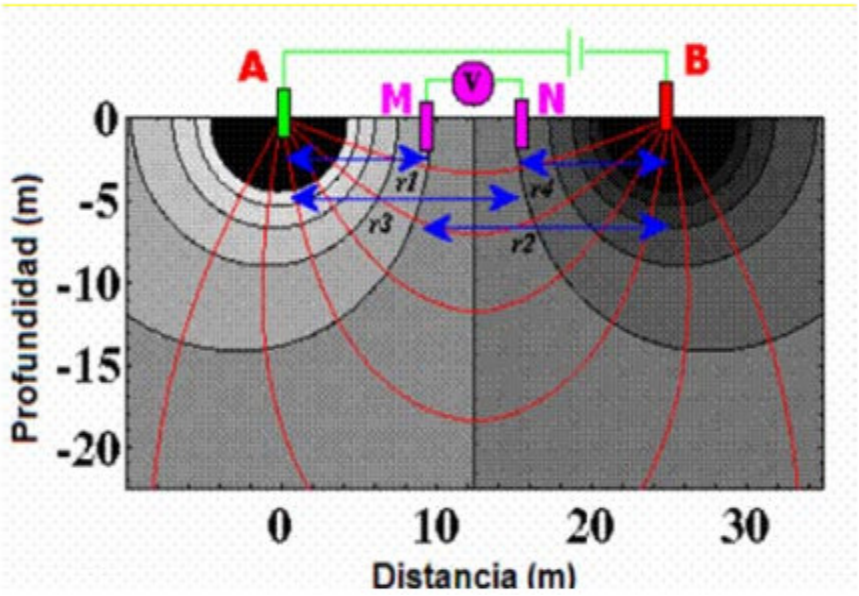


Figura 1.
Líneas de corriente (rojo) y de potenciales (www.trxconsulting.com).

Para medir la diferencia de potencial se necesitan dos electrodos. Teóricamente los electrodos de inyección A y B pueden ser usados para medir la respuesta de la señal. Sin embargo, la resistencia de transición entre los electrodos y la superficie puede ser influenciada por las medidas en un comportamiento desconocido.

Se necesitan un par de electrodos para medir la diferencia de potencial en un arreglo de cuatro electrodos, que son usados comúnmente en sondeos de

corriente directa (CD). Sustrayendo el potencial del punto N del M, la diferencia de potencial ΔU entre M y N:

$$\Delta U = \frac{I\rho}{2\pi}\left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right] = \frac{I\rho}{K}. \quad (3.14)$$

Donde r_3 es la distancia entre N y A y r_4 es la distancia entre N y B. Donde K sólo contiene las distancias entre los electrodos, que es llamado el "facto geométrico" y depende sólo de la distribución de los electrodos. Finalmente,acomodando la ecuación 3.14, obtenemos:

$$\rho = K\frac{\Delta U}{I}. \quad (3.15)$$

Para la tierra no homogénea, esta ecuación produce valores que varían de acuerdo con el arreglo geométrico usado en la superficie. Los valores obtenidos de la ecuación 3.15 para un subsuelo no homogéneo son llamados resistividades aparentes ρ_a.

3.2. Fundamentos del método

La ecuación 3.15 es la base fundamental del método geoeléctrico, y permite obtener de una manera sencilla la resistividad eléctrica ρ del subsuelo.

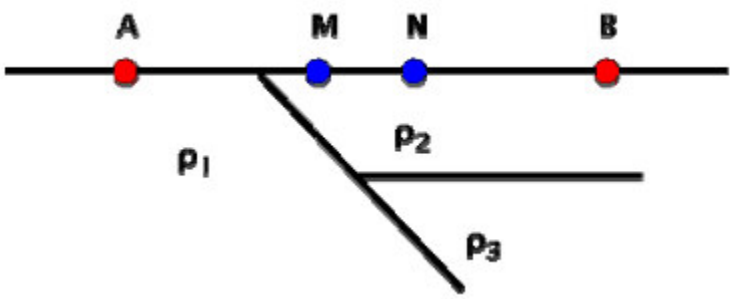


Figura 2. Heterogeneidades del subsuelo

Como se mencionó anteriormente, si se realizan mediciones para obtener laintensidad de corriente inyectada por los electrodos A y B de la figura 2, y medimos los potenciales inducidos entre los electrodos M y N, aplicando la fórmula anterior, resultará una resistividad ficticia, que se denominó resistividad aparente ρ_a , que no será exactamente igual a la resistividad ρ_1 verdadera de la zona del electrodo A, ni la ρ_2 bajo los electrodos M y N y B, sinoque dependerá de ρ_1, ρ_2, ρ_3. Esta resistividad no puede considerarse como promedio ni como media ponderada de las tres resistividades, pudiendo ocurrir que fuese mayor o menor que cualquiera de ellas.

La resistividad aparente es la variable experimental básica en todos los estudios geoeléctricos. De este modo, la expresión general de la resistividad aparente de subsuelo, tendrá la forma:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta U}{I}, \quad (3.15a)$$

Donde:
ρ_a = Resistividad aparente del subsuelo,
K = constante del dispositivo geoeléctrico, que depende de lageometría del mismo,
ΔU = Voltaje medido,
I = Intensidad medida,

En el presente estudio cuando se mencione la resistividad, será importante observar si se trata de la resistividad aparente o de la resistividad verdadera del medio donde circula la corriente Ver tabla 1. La resistividad aparente y la resistividad verdadera sólo coinciden cuando el subsuelo es absolutamente homogéneo, sin heterogeneidades.

En la tabla 1 se reflejan los rangos de valores de resistividad de algunosmateriales de interés geológico. (Loke,2004):

EJEMPLOS DE RESISTIVIDAD VERDADERA DE ROCAS, SUELOS Y MINERALES (Loke, 2004)			
MATERIAL	**RESISTIVIDAD VERDADERA**	**MATERIAL**	**RESISTIVIDAD VERDADERA**
Granito	$6.10^3 - 10^6$ Ω.m	**Arcilla**	1 – 100 Ω.m
Esquisto	$30 - 10^4$ Ω.m	**Marga**	4 – 90 Ω.m
Mármol	$100 - 4.10^8$ Ω.m	**Depósitos aluviales**	10 – 900 Ω.m
Cuarcita	$100 - 3.10^8$ Ω.m	**Agua dulce**	10 – 100 Ω.m
Pizarra	$800 - 5.10^7$ Ω.m	**Agua marina**	0.3 Ω.m
Caliza	$70 - 7.10^3$ Ω.m	**Esquisto grafítico**	$10^{-4} - 7.10^{-3}$ Ω.m
Arenisca	$10 - 6.10^3$ Ω.m	**Carbón antracítico**	$10^{-5} - 2.10^{-5}$ Ω.m

3.3. Prospección geoeléctrica

La prospección geoeléctrica de superficie representa un método de análisis de los geomateriales en términos de sus propiedades eléctricas. De ellas la resistividad y la conductividad eléctrica es bastante importante y ha sido relacionada con parámetros hidrológicos como la porosidad la compacticidad el grado de saturación, entre otros; así también se han desarrollado trabajos enfocados a determinar la existencia de contaminantes en el terreno para determinar de forma a priori métodos de remediación, antes de iniciar programas de exploración de alto costo.

En la figura 3 se ilustra uno de los principios básicos de las prospecciones geoeléctricas: A mayor longitud del dispositivo mayor penetración en elsubsuelo. El caso (a) de la figura muestra como para separaciones pequeñas deelectrodos, la corriente está virtualmente confinada a la zona (ρ_1) superficial. En el caso (b), cuando los electrodos se abren más, alargándose así la longitud del

dispositivo, la penetración en el subsuelo se incrementa, proporcionando más información sobre (ρ_2).

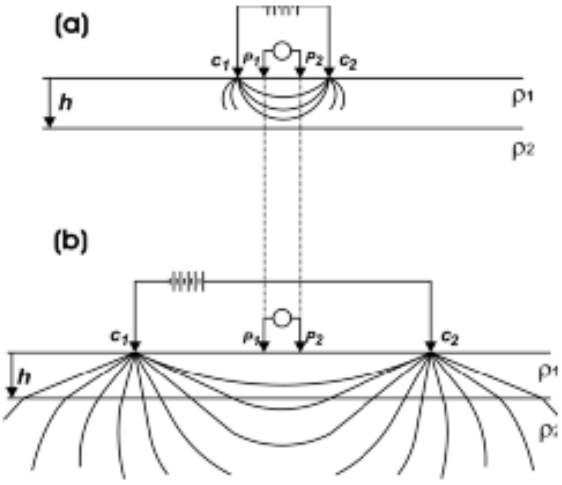


FIGURA 3. Principio de penetración de los dispositivo geoeléctricos.

3.4. Dispositivos Geoeléctricos

Se conoce como “Dispositivo Geoeléctrico” al conjunto de electrodos que inyecta corriente en el subsuelo y registra el potencial generado en el mismo figura 4. Generalmente, los dispositivos suelen disponer de cuatro electrodos, aunquetambién suelen emplearse los dispositivos de tres electrodos o de sólo dos. Unapareja de electrodos se denomina “de corriente”, y son los responsables deinyectar la electricidad en el subsuelo, y otros dos electrodos son “de potencial”,empleándose para medir el voltaje generado en el subsuelo por la corriente inyectada.

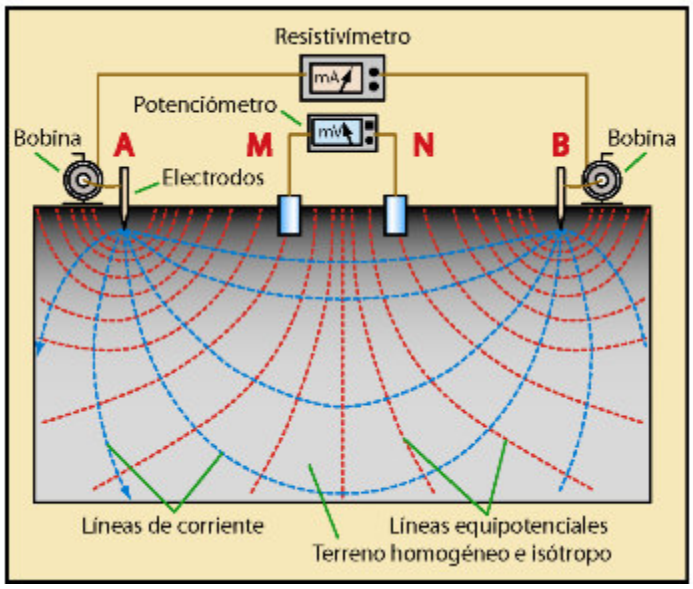
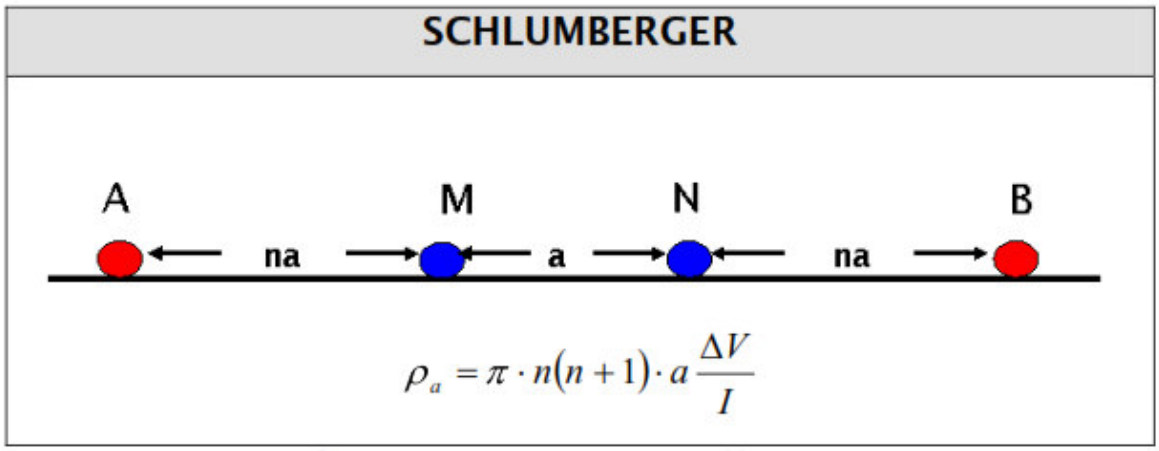


Figura 4. Dispositivo Geoeléctrico sobre un terreno homogéneo e isótropo. (Tomado de Martínez, P. 2006).

Los diferentes tipos de dispositivos empleados en el método geoeléctrico se diferencian entre sí por la distancia relativa entre electrodos, y la posición de los electrodos de corriente respecto a los de potencial. En la figura 5, se muestran los dispositivos empleados a lo largo del trabajo, también se detalla el valor de la resistividad aparente de cada dispositivo:



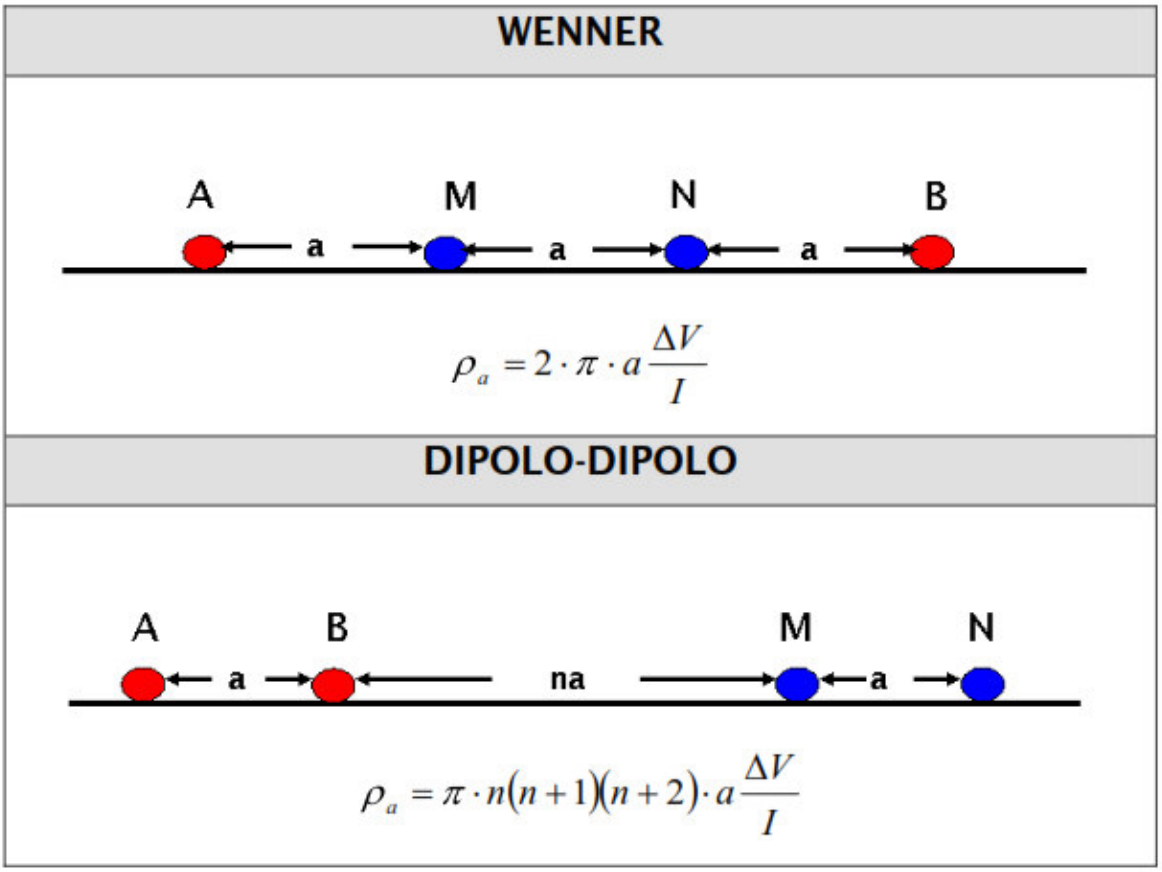


Figura 5. Dispositivos geoeléctricos.

Cuando seleccionamos los dispositivos geoeléctricos, son muchos los factores que hay que tener en consideración. De acuerdo con la tabla 2 se muestran los factores a considerar:

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS				
DISPOSITIVO	Intensidad de la Señal de Respuesta	Resolución	Sensibilidad frente Heterogeneidades del Terreno	Ruido de Acoplamiento Electromagnético
Wenner	A	A	C	C
Schlumberger	B	A	C	B
Dipolo-Dipolo	C	B	A	A

Nota: A corresponde a la opción más favorable, mientras que C corresponde a la peor. La letra B corresponde a un valor intermedio, en orden de preferencia.

Tabla 2. Factores que influyen en la selección de dispositivos.

En el estudio de túneles se suelen emplear generalmente los dispositivos dipolo-dipolo, por varias razones:

* Son los dispositivos menos sensibles al acoplamiento electromagnético, presentando además una buena resolución.

* El dispositivo dipolo-dipolo es el más sensible para detectar estructuras verticales, tales como fallas, que constituyen uno de los mayores riesgos geotécnicos en la construcción de túneles.

Para el caso de prospecciones arqueológicas, aguas subterráneas, etc.Es fundamental una excelente resolución, ya que los objetos a detectar son de pequeño tamaño. Por ello, suelen emplearsefundamentalmente los dispositivos Wenner o Schlumberger.

3.5. Modelización Geoeléctrica del subsuelo

Para el estudio del subsuelo mediante métodos geoeléctricos, se recurre habitualmente a modelar el terreno mediante modelos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales:

***Modelos unidimensionales 1-D:** este tipo de modelos suponen que la resistividad del subsuelo varía sólo con la profundidad (coordenada z). Equivale a un modelo bidimensional de capas horizontales. Mediante este modelo se estudian los terrenos estratificados horizontalmente, aplicando sondeos eléctricos verticales, generalmente en dispositivo Schlumberger.

***Modelos bidimensionales 2-D**: en estos modelos la resistividad varía lateralmente (coordenada x) y en profundidad (coordenada z). Es el modelo más aplicado en la práctica geoeléctrica, por ejemplo; para el estudio de túneles, cimentaciones, aguas subterráneas, detección de cuevas, etc. Se suelan emplear con dispositivos tipo Dipolo-Dipolo o Wenner.

***Modelos tridimensionales 3-D**: la resistividad varía en las tres dimensiones del espacio. Son modelos complejos, que se emplean para problemas muy específicos en los que no es suficiente una modelación 2 -D. La realización de registros de resistividad eléctrica 1-D (SEV, etc.), conlleva la realización de 10 a 20 lecturas. A medida que se incrementa la dimensión del modelo, se incrementa el número de lecturas necesarias. De este modo, para un reconocimiento 2-D, suelen realizarse

entre 100 y 1.000 lecturas, cifra que se ve incrementada a varios millares para el caso de los reconocimientos 3-D.

El perfil 2-D es, hoy en día, la mejor solución de compromiso entre el bajo costo (pocas lecturas), y el valor y cantidad de información aportada. Los datos de resistividad aparenteproporcionados, son procesados e invertidos para obtener una tomografía eléctrica 2-D,que constituye el tipo de registro de resistividad más empleado hoy en día.

3.6. Sondeos de resistividad 1-D

Como se mencionó anteriormente, los métodos de resistividad se empezaron a trabajar seriamente con los hermanos Schlumberger y Wenner, en 1915. Por aproximadamente 60 años fue usada la interpretación cuantitativa para los sondeos convencionales. En estos métodos, el punto central del arreglo permanece fijo, y se varía el espacio entre los electrodos, incrementándose para obtener información sobre secciones más profundas del subsuelo.

El método usado con más frecuencia es el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). El SEV es diseñado para obtener perfiles verticales de resistividad versus profundidad. Esta técnica es basada en la observación de que la corriente penetra mas profundo en la superficie si se aumenta la separación de los electrodos. La profundidad de penetración depende de varios factores. Aunque la mayoría de las configuraciones de los electrodos pueden usarse para el SEV, el tipo Schlumberger ofrece avances importantes en lo que a logística se refiere, ya que sólo dos electrodos son movidos.

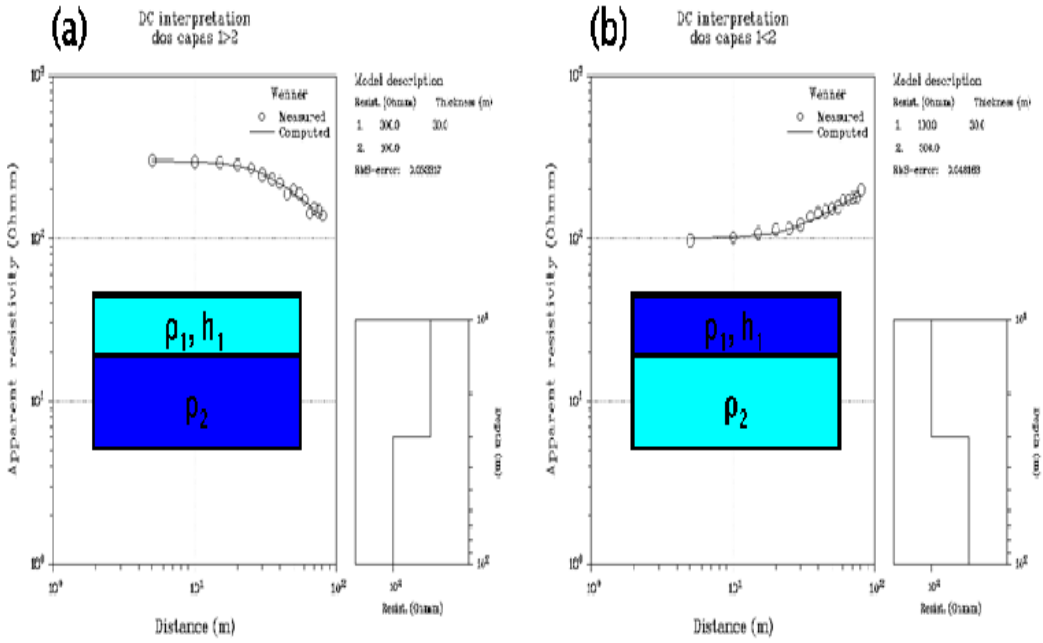


Figura 6. Perfil 1.D de dos capas. (a) ρ1> ρ2 y (b) ρ1< ρ2

Las interpretaciones de los datos de los SEV se basan en la suposición de que en el área de investigación se encuentra un número finito de capas horizontales. Los análisis primarios consisten en comparar las formas de las curvas (logaritmo de la resistividad aparente versus el logaritmo del espacio medio de los electrodo de corriente) con modelos de curvas de estructuras de resistividad típicas. En las figuras 6 y 7, se muestran el resultado típico de curvas de dos y tres capas respectivamente.

Como en la mayoría de las técnicas geofísicas, la interpretación de los datos de resistividad no es única, podemos describir el comportamiento de una capa resistiva de cierto espesor entre dos capas conductivas; y con el hecho de variar un poco el espesor de la capa resistiva, ya se varía el modelo que resulte.

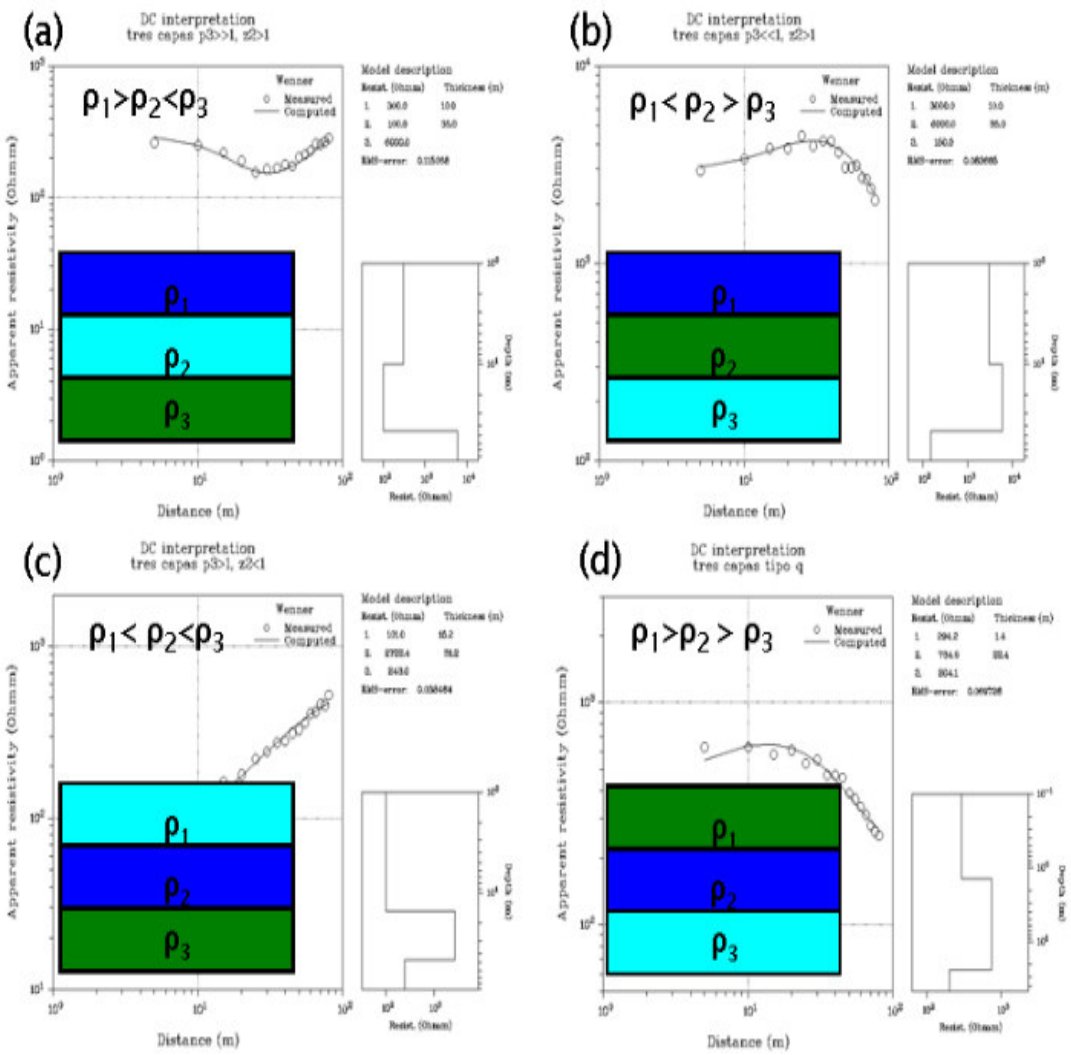


Figura 7. Perfil 1-D modelo de tres capas.

3.7. Tipos de arreglos utilizados en el sondeo 1-D

3.7.1. Wenner

En este tipo de arreglo la separación entre los electrodos AM, MN y NB se va variando por un factor "n". Manteniéndola constante durante todas las mediciones como se observa en la figura 8. La distancia utilizada para realizar los perfiles de resistividad es la AM.

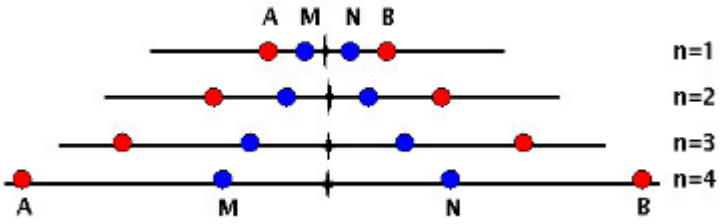


Figura 8. Medidas en el dispositivo Wenner 1-D.

3.7.2. Dipolo – Dipolo

En este tipo de arreglo los electrodos de corriente AB y los de potencial MN mantienen la distancia constante, variando la distancia entre los polos formado por cada par de electrodos, como se observa en la figura 9. La distancia utilizada para los perfiles de resistividad es la BM.

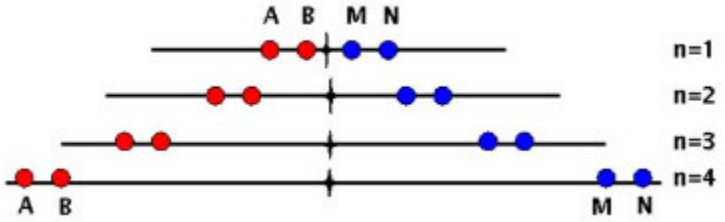


Figura 9. Medidas en el dispositivo 1-D dipolo-dipolo.

3.7.3. Schlumberger

La distancia entre los electrodos de potencial MN se mantiene constante, variando la distancia entre los electrodos de corriente como se observa en la figura 10. La distancia utilizada en los perfiles de resistividad es de AB/2.

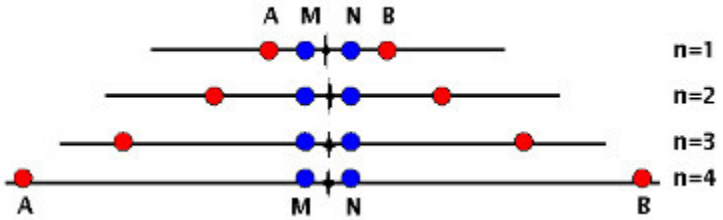


Figura 10. Medidas en el dispositivo 1-D Schlumberger.

3.8. Sondeos de resistividad 2-D

Para este tipo de estudios es especialmente efectiva la técnica geofísica denominada tomografía eléctrica, que puede considerarse como fruto de la evolución de los métodos geoeléctricos clásicos, como el SEV y la calicataeléctrica. La forma más habitual de realizar este tipo de medidas es colocar la cantidad deelectrodos deseada de forma alineada, con una distancia interelectródica constante. De hecho, el principio físico es el mismo, sin embargo en este caso en lugar de energizar y medir con cuatro electrodos, que van cambiando progresivamente sus emplazamientos, se utiliza una serie de electrodos (16, 24, 32, 48, 64 etc.) que permanecen fijos en el terreno y con los cuales es posible obtener un número más elevado de medidas combinadas (figuras 11(a), 11(b), 11(c)).

Para activar o desactivar los electrodos de corriente y/o los de potencial enforma automática se utiliza un sistema controlado por un computador.
Esta técnica se conoce también como sondeo eléctrico continuo o CVES (Contiuous vertical electrical sounding), que permite visualizar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo mediante secciones bidimensionales.

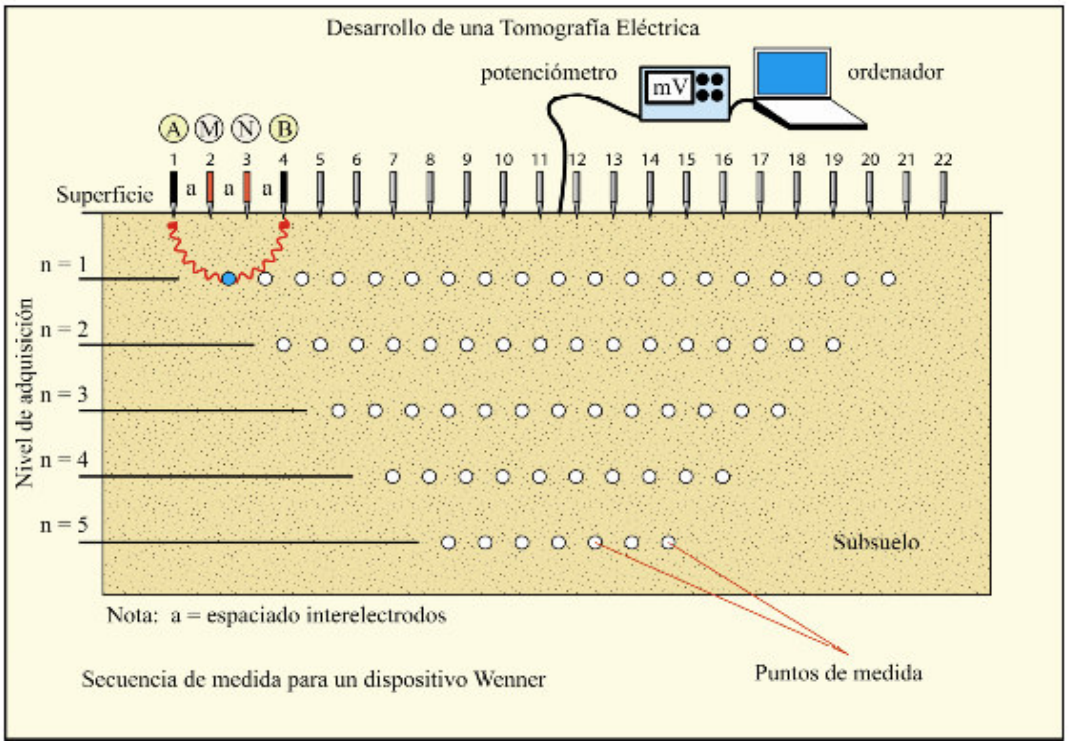


Figura. 11(a). Representación esquemática de la secuencia de medida, para un dispositivo Wenner, en el primer nivel de adquisición. (Tomado de Martinez, P. 2006).

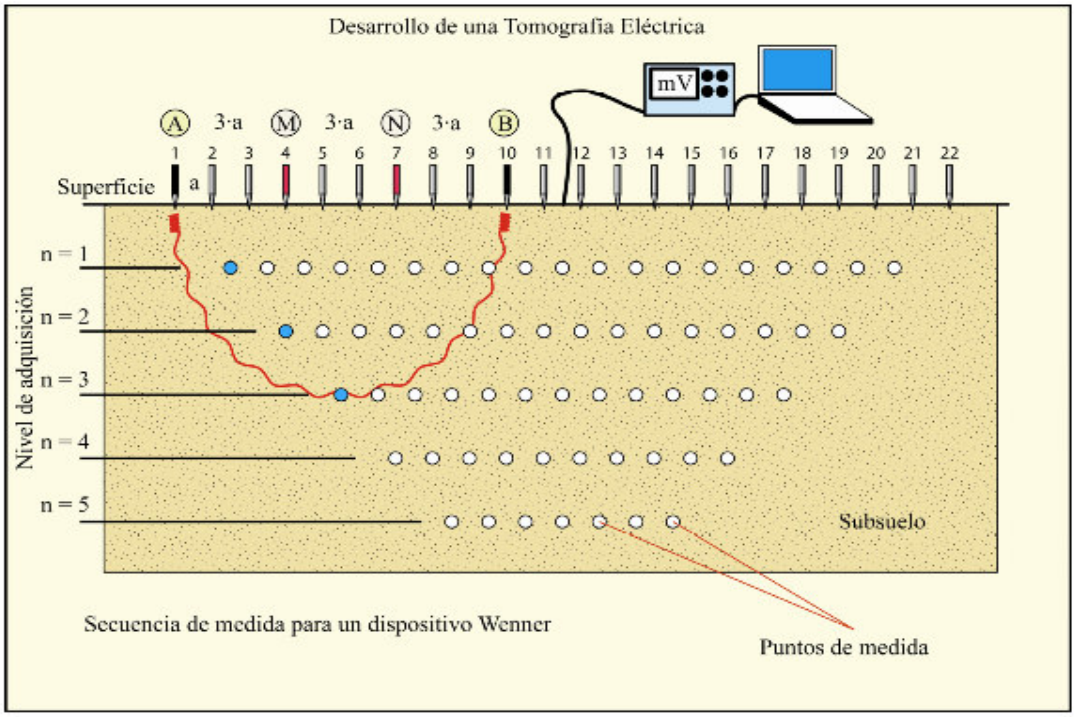


Figura. 11(b). Representación esquemática de la secuencia de medida, para un dispositivo Wenner, en el tercer nivel de adquisición. (Tomado de Martínez, P. 2006).

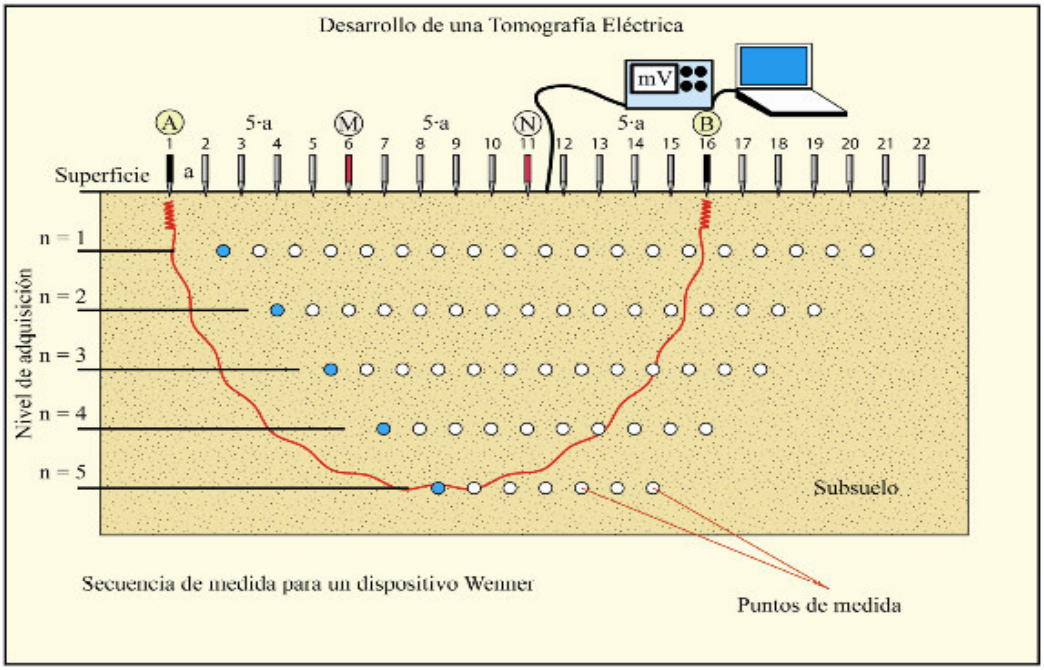


Figura. 11(c). Representación esquemática de la secuencia de medida, para un dispositivo Wenner, en el Quinto nivel de adquisición. (Tomado de Martínez, P. 2006).

3.9. Tomografía eléctrica Resistiva (TER).

Las Tomografías Eléctricas Resistivas (TER) son métodos geofísicos de exploración o Ingeniería Geofísica, los cuales están constituidos por una serie de técnicas que permiten medir las variaciones de diversas propiedades físicas en los materiales que forman la corteza terrestre tales como: densidad, susceptibilidad magnética, velocidad de propagación de las ondas elásticas, resistividad eléctrica o la radioactividad natural de las rocas, entre otras. La medición y distribución de estas variaciones, permite inferir algunas condiciones litológicas y estructurales del subsuelo, correlacionando los valores medidos o zonas anómalas, con los efectos calculados de los modelos de laboratorio, en los que se conocen las relaciones causa-efecto en términos deuna función matemática.

La Tomografía Eléctrica Resistiva es una técnica geofísica para generar secciones o perfiles del subsuelo en base a mediciones de caída de potencial eléctrico ver figura 12. Éste método consiste en inyectar una corriente al interior del suelo, la cual, regresa al voltímetro en forma de

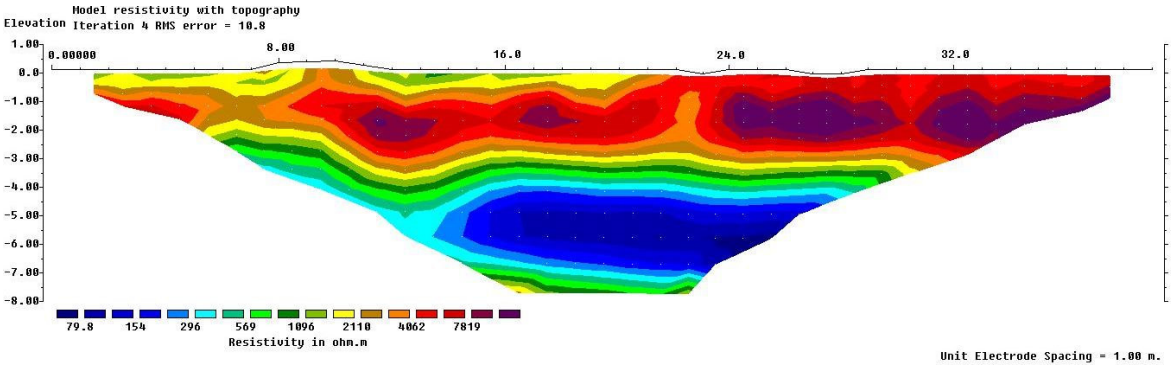


Figura 12. La tomografía geoeléctrica, con 40 electrodos distanciados 1 metro y una longitud total de 39 metros.

Una diferencia de potencial (ΔV) producto de las variaciones en resistencia que resultan de cada tipo de material o estrato de suelo (Figura 13). Los Estudios de tomografía Eléctrica han sido utilizados en investigaciones sobre hidrogeología, geotecnia y también actualmente en estudios ambientales.

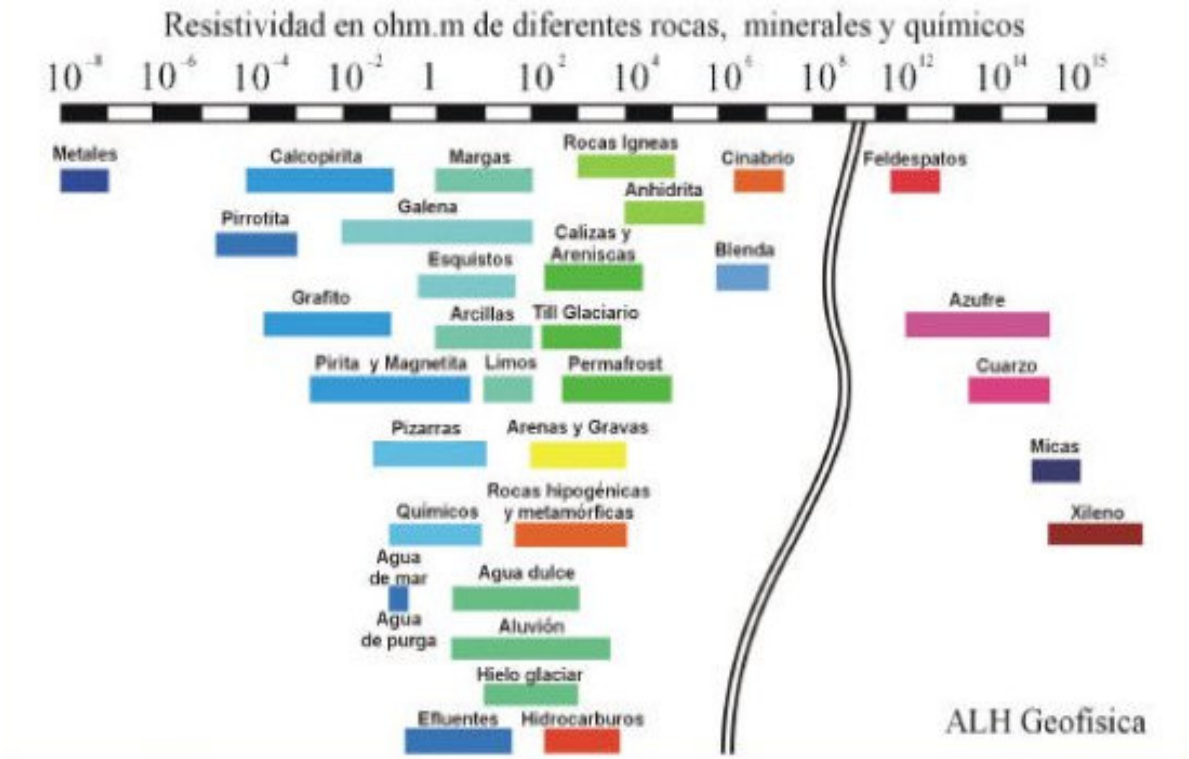


Figura 13. Muestra la resistividad de algunos minerales y rocas

4. METODOLOGIA

*Revisión de la teoría de los métodos a utilizar, como también estudiar sobre la correcta toma de datos en terreno.

*Revisión de estudios efectuados con los métodos, para ver alcances de los mismos. Estudio de antecedentes geológicos e hidrogeológicos de dicha zona.

*Gestionar todo lo necesario para realizar el terreno, desde conseguir permisos al lugar de estudio, comprar cables adecuados, estacas, mazos, revisar aceite del generador, bujía, combustible, etc.

*Destinar un día para probar equipos, en un lugar idóneo para ello, sin necesidad que sea el mismo lugar de estudio (Laboratorio).

*Siempre es importante informar a los participantes sobre los riesgos implícitos en todos los terrenos. Una charla de seguridad antes de salir es necesaria. Esta charla incluye la vestimenta necesaria, el correcto manejo de los equipos como también la importancia de mantener disciplina en terreno.

*Movilización a la zona de estudio. Es importante mantener orden con las cosas para que nada se pierda, como también no botar basura en el lugar de trabajo.

*Medir la zona de interés. Será necesario de personal capacitado para realizar la prospección.

*Hoja para ingresar los valores medidos y la otra el dispositivo. Para los métodos activos se necesitan 5 personas dependiendo el método elegido; dos que muevan los electrodos, uno que maneje el transmisor, otro que anote los datos y otro que maneje el Telurometro y radio.

*Procesamiento de datos, Generación de grilla cortes geoeléctricos 1D y 2D, Interpretación.

Figura 14(a)



(b)



(c)



(d)



Reconocimiento de campo figura 14. (a), (b), pruebas de funcionamiento y calibración de los instrumentos (c), equipos en campo para la prospección geoeléctrica (d).

4.1. Herramientas y equipos requeridos

- Dos Telurometros digitales marca MEGABRAS EM4055.
- Dos multímetros digitales marca Fluke 179
- Un calibrador de Procesos marca Fluke 726.
- Kit de picas (electrodos) y cables de tierra.
- 10 dataloger de la marca EXTECH para determinar las condiciones ambientales.
- Un termómetro PT-100 digital Marca Control Company.
- Dos equipos ESTACION TOTAL digital marca LEICA TS02.
- Una cinta métrica de 50mt.

*Una laptop / PC

*GPS

* Cámara.

* Herramientas de mano.

* Carpa.

* Material se seguridad industrial.

* Radios portátiles.

Los equipos ver Figura 15,16,17, mencionados cuentan con certificación de calibración de acuerdo a las normas NTP-ISO/IEC 17025:2006, ISO/IEC 61010-1, estos instrumentos pertenecen a los laboratorios de la empresa ADVANCED METROLOGY S.A.C, con RUC: 20515109766.

Figura 15. Telurometro Megabras EM 4055

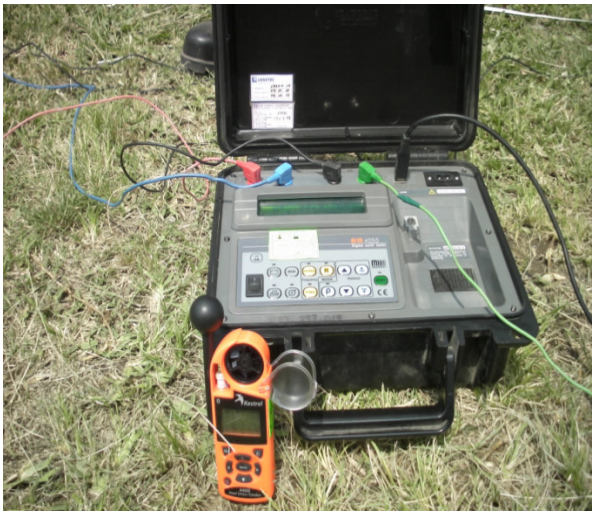


Figura 16. Estación total Leica TS02



Figura 17. dataloger de la marca EXTECH para determinar las condiciones ambientales.



4.2. Aplicación de la prospección geoelectrica

Para medir la resistividad de un suelo, se aplica una corriente en el suelo por intermedio de dos electrodos y se mide una diferencia de potencial por intermedio de otros dos electrodos. De estas medidas de corriente y potencial se define la resistividad del suelo para una profundidad de investigación que aumenta con la distancia entre los electrodos de corriente ver las figura 18, 19. Cuando se desea conocer las variaciones de la resistividad del subsuelo con la profundidad se utiliza el sondeo eléctrico, donde se hacen mediciones a lo largo

de una línea dada en incrementos crecientes de distancia entre los electrodos de corriente A y B. El análisis de datos se realiza por medio de un programa res2dinv, res3dinv de geotomo software. La prospección geoeléctrica combina en cada medición dos pares de electrodos. Se denominan A-B los electrodos que introducen corriente en el terreno y M-N los que detectan superficies de diferente potencial para llevar a cabo una investigación 1D, 2D, 3D (tomografía geoeléctrica) con suficiente calidad ver figuras 20, 21, 22,23.

Figura 18.



Figura 19.





En nuestro caso una configuración de corriente en estos métodos eléctricos es el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), dado que es posible producir modelos unidimensionales que corresponden a puntos discretos en la superficie. Con un programa de interpretación se puede determinar a partir de la curva de sondeo experimental los espesores y las resistividades de las diferentes capas del subsuelo. Cuando se desea conocer las variaciones laterales de resistividad del subsuelo, se utiliza una longitud de línea de corriente fija, determinada en relación con la profundidad de investigación esperada, y se mueven los cuatro electrodos (de corriente y de potencial) al mismo tiempo, a lo largo de un perfil de medida. Se utiliza generalmente este dispositivo de « perfilaje eléctrico » cuando se buscan zonas alteradas o fracturadas. De ellas la resistividad eléctrica, la conductividad eléctrica es bastante importante y ha sido relacionada con parámetros hidrológicos como la porosidad la compacticidad el grado de saturación, entre otros. Así también se han desarrollado trabajos enfocados a determinar la existencia de contaminantes en el terreno para determinar de forma a priori métodos de remediación ambiental, antes de iniciar programas de exploración de alto costo.

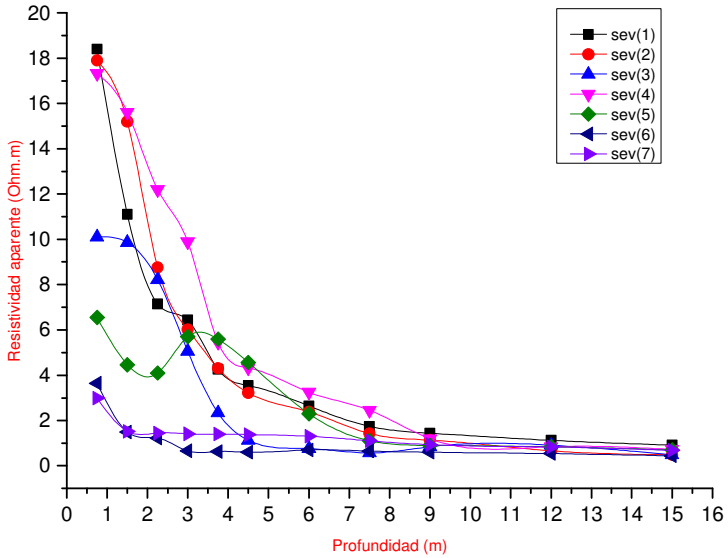


Figura 20.*SEV 1D de la zona 1 cuenca baja del rio chillón, variación de la resistividad del subsuelo con la profundidad.*

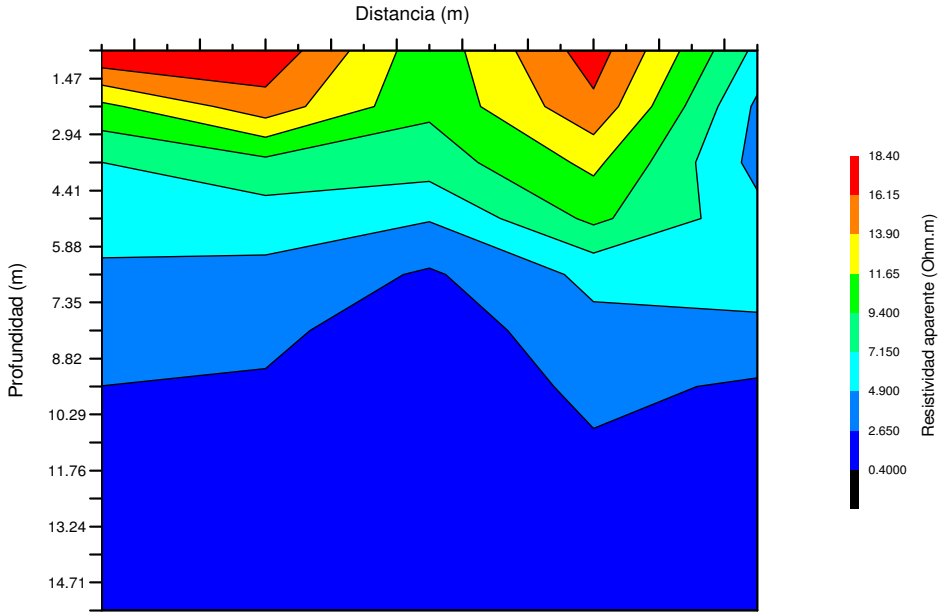


Figura 21. *Perfil de Tomografía eléctrica 2D, zona 1 cuenca baja del rio chillón variación de la resistividad del subsuelo con la profundidad.*

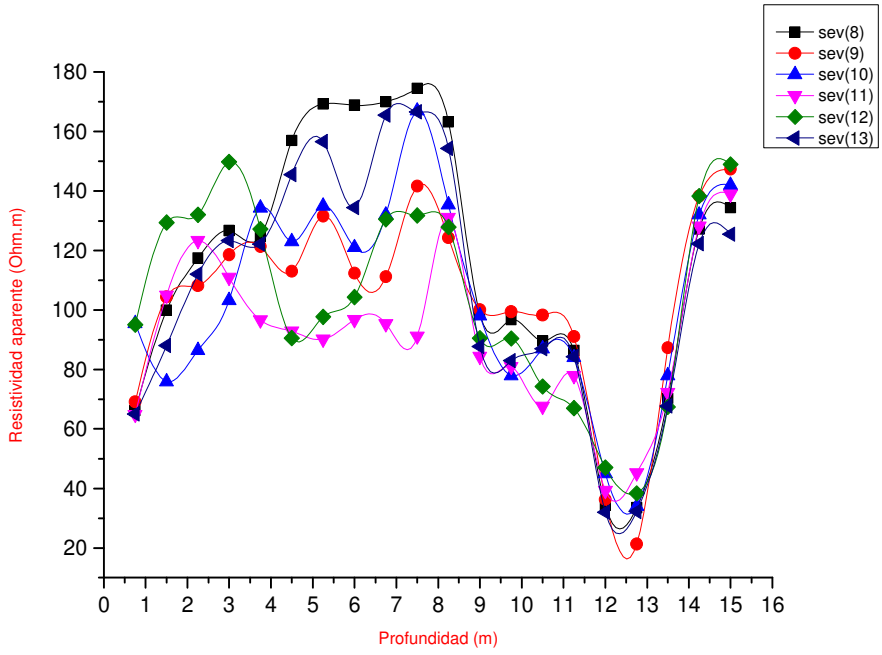


Figura 22.*SEV 1D de la zona 2 cuenca baja del rio chillón, variación de la resistividad del subsuelo con la profundidad.*

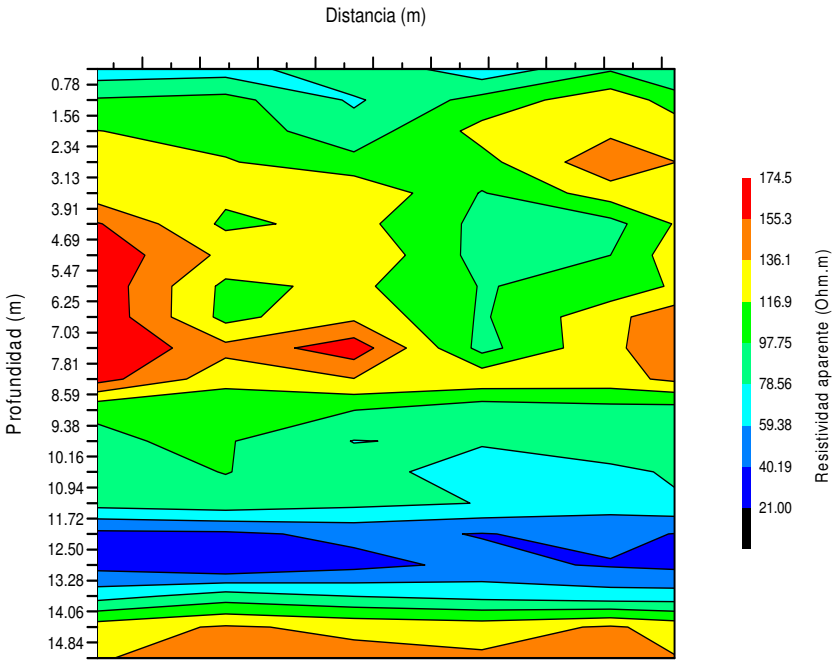


Figura 23. *Perfil de Tomografía eléctrica 2D, zona 2 cuenca baja del rio chillón variación de la resistividad del subsuelo con la profundidad.*

De acuerdo al estudio de prospección geoeléctrica en el área de estudio se ha determinado un suelo altamente conductivo ver figura 20,21 resistividades eléctrica de 0.4 a 11.65 Ohm.m a una profundidad de 14.7m del subsuelo investigado, también se determinó una formación acuífera, identificada mediante resistividad eléctrica de 21,5 a 78,56 Ohm.m. a una profundidad de 9 a 11m, Ver figura 22, 23.

Para investigar una parte de los depósitos del acuífero, se ha utilizado el método de resistividad eléctrica en su modalidad de sondajes eléctricos verticales utilizando la configuración Wenner, tomografía eléctrica.

De los resultados se priorizarán los mejores horizontes con condiciones Hidrogeológicas para llevar a cabo una investigación Hidrogeológica mediante una perforación hasta una profundidad aprovechable, dependiendo de la resistividad.

Realización de tomografía eléctrica en Rellenos.

En este trabajo, mostraré un ejemplo de la aplicación de la tomografía eléctrica a un caso real; en concreto, a la detección del espesor de residuo sólido urbano (RSU) y residuos de materiales de construcción (runas), en un vertedero. Una vez analizada la zona de estudio, (geología, extensión, topografía, accesibilidad, etc.), se determina que para este caso, el método de la tomografía eléctrica es aplicable y que puede dar buenos resultados.

La zona era accesible, había extensión suficiente para realizar los perfiles, la topografía era prácticamente plana, la profundidad estimada de la base del vertedero alcanzable y existía un buen contraste de resistividades entre los materiales de relleno del vertedero y la base sobre la cual se depositaban. Debido a que se tenía extensión suficiente y en algunos puntos se preveía que el espesor de relleno del vertedero alcanzara los 30 m se optó por realizar perfiles con una separación entre electrodos de 3.0 a 4.0 m que implicaba una longitud de perfil de 144 m y permitía alcanzar una profundidad máxima en el centro del perfil de 27 a 36 m ver figura 24.

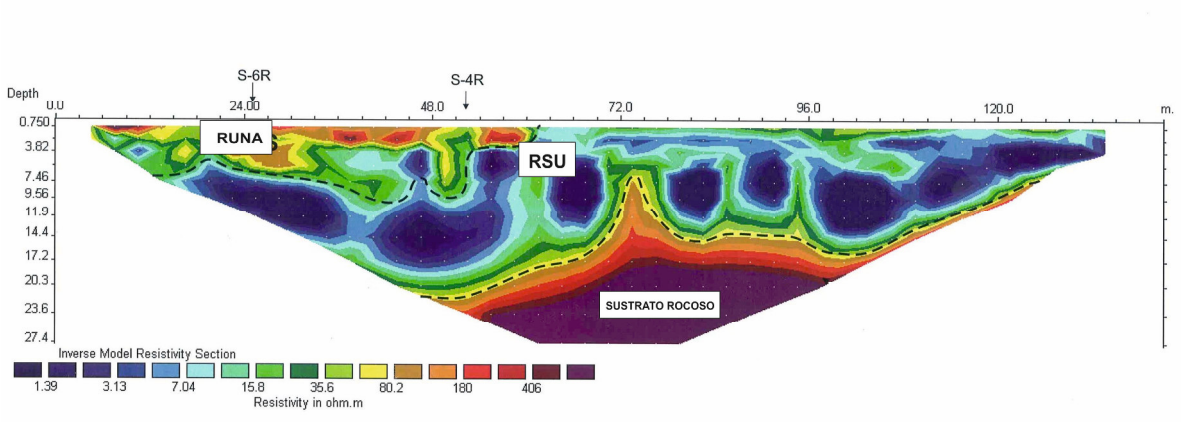


Figura 24. *Perfil de tomografía eléctrica realizado en el vertedero, en el cual se puede diferenciar el sustrato rocoso, el residuo sólido urbano (RSU) y los residuos de materiales de la construcción (Runas), en base a su resistividad.*

En este perfil, realizado en el vertedero, se puede diferenciar a partir de los valores de resistividad: el sustrato rocoso (base del vertedero), los residuos sólidos urbanos (RSU) y los residuos de materiales de la construcción (runas).

Cabe indicar, que paralelamente a la prospección geofísica, se realizó una exploración geotécnica de sondeos a rotación con extracción de muestra continua, en diferentes puntos del perfil, lo que permitió verificar los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica con un método directo, como son los sondeos. Si observamos el perfil, podemos distinguir una zona que presenta un comportamiento eléctrico muy homogéneo y resistivo (colores morados), con valores superiores a los 400 Ohm.m. Esta zona se corresponde con el sustrato rocoso, que constituye la base del vertedero, y que, en base la geología de la zona y los sondeos realizados, estaba constituido por granito. La homogeneidad del comportamiento eléctrico, nos indica que en esta zona, el granito, presenta poca fracturación y alteración.

En el perfil también se puede observar un nivel intermedio que presenta un comportamiento algo más heterogéneo y claramente conductivo (colores azules y verdes), con valores de resistividad eléctrica de 1 a 15 Ohm·m. Este nivel representaría el residuo sólido urbano (RSU), constituido por arcillas y materiales principalmente orgánicos y con un alto contenido en lixiviado, que da una respuesta eléctrica conductiva.

Por último, en la parte superior izquierda del perfil, se identifica un nivel, que presenta un comportamiento eléctrico bastante heterogéneo y con valores de resistividad intermedios entre los RSU y el Sustrato Rocoso, y que indican la presencia de un relleno de materiales de la construcción. Este relleno presenta un comportamiento menos continuo, porque está constituido por una mezcla de muchos elementos con distintos valores de resistividad (bloques de hormigón, hierros, cristales, ladrillos, etc). No obstante, cabe indicar que su presencia se confirmó también con la realización de un sondeo.

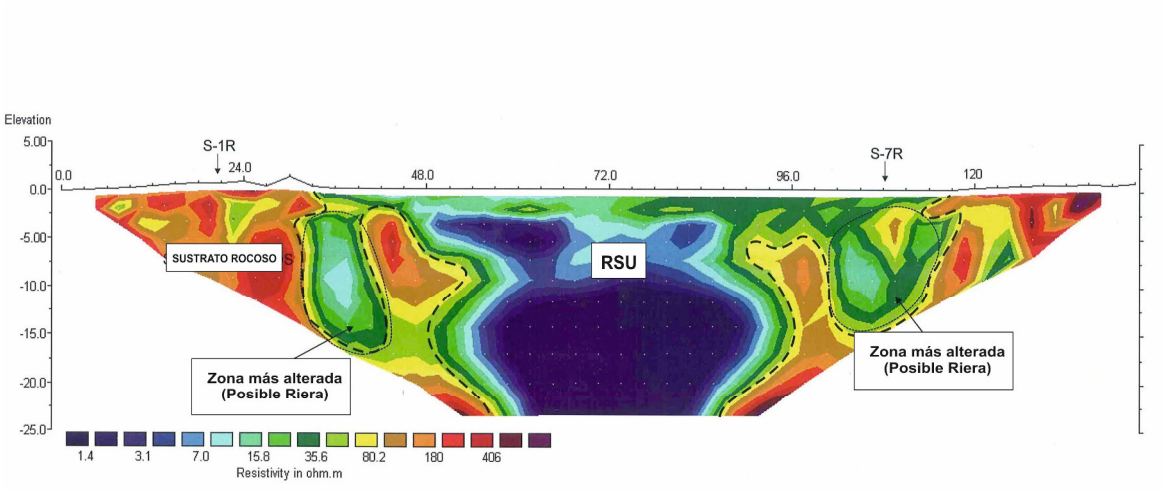


Figura 25.*Perfil de tomografía eléctrica realizado en el vertedero, en el cual se puede distinguir el sustrato rocoso, los RSU y dos zonas que se pueden interpretar como rieras.*

En este segundo perfil figura 25, al igual que en el anterior, se diferencia: una zona que presenta un comportamiento eléctrico homogéneo y conductivo (colores azules) y que se correspondería con los residuos sólidos urbanos (RSU) y una zona resistiva con valores superiores a 400 Ohm·m, que se correspondería con el sustrato rocoso. Respecto al sustrato (granito), en este perfil, se puede ver como éste, presenta un comportamiento eléctrico más heterogéneo, debido a que en esta zona una mayor alteración y fracturación. Además, se puede distinguir también, a ambos lados del RSU, dos zonas, que presentan un comportamiento eléctrico, de 10-40 Ohm·m (colores verdes) y cuya morfología parece tener una forma de U bastante pronunciada. En base a su comportamiento eléctrico, estos materiales no podrían corresponderse ni con el sustrato rocoso (comportamiento eléctrico muy resistivo y homogéneo), ni con RSU (comportamiento eléctrico muy conductivo y bastante homogéneo), ni con las runas (comportamiento eléctrico resistivo y heterogéneo.En todo caso, podría corresponderse con una zona del sustrato rocoso muy alterada (grado de alteración), aunque por su morfología es más lógico pensar que se trata de algún tipo de riera. Para confirmar esta sospecha, se recurrió de nuevo a los sondeos, lo que permitió confirmar que esta zona estaba constituida por materiales arcillosos-arenosos, correspondientes a depósitos de riera.

Así que en este caso, el método de la tomografía eléctrica, ha sido útil para determinar el límite entre el sustrato rocoso y los rellenos de vertedero (RSU y

runa), pudiendo también confirmar los espesores de los mismos, así como diferenciar entre diferentes tipos de relleno. Así mismo, ha permitido cartografiar la presencia de posibles rieras dentro de la zona de estudio, lo que de cara al estudio geotécnico, es importante. Para concluir, cabe recalcar que, si bien los resultados de la tomografía eléctrica eran bastante claros, por existir un buen contraste entre el comportamiento eléctrico de los materiales que constituyen la zona, si no se hubiera contado con sondeos a rotación con extracción de muestra continua ver figura 26, los resultados obtenidos no hubieran sido tan completos y fiables.

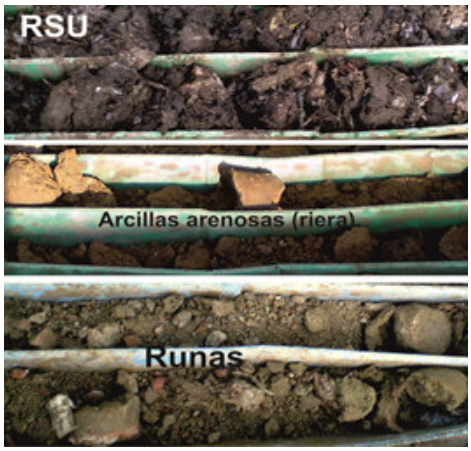


Figura 26. Muestras extraídas de los sondeos a rotación, en las que se puede ver el aspecto y composición de los RSU, las runas y las arcillas-arenosas.

5. CONCLUSIONES

*Se determinado un subsuelo altamente conductivo con resistividades eléctricas de 0.4 a 11.65 Ohm.m hasta una profundidad de 14m, también se determinó un nivel acuífero, con resistividad eléctrica de 21,5 a 78,56 Ohm.m. a una profundidad de entre los 9 y 11m.

*Se determino que la humedad relativa y la temperatura altera la resistividad de los suelos en una prospección geofísica.

*En tomografía eléctrica (figura 24) se determino valores de resistividad eléctrica de 1 a 15 Ohm.m. Este nivel representaría el residuo sólido urbano (RSU), constituido por arcillas y materiales principalmente orgánicos y con un alto contenido en lixiviado, que da una respuesta eléctrica conductiva, con un sustrato de 400 Ohm.m a una profundidad de 23m.

*En la tomografía eléctrica (figura 25) tiene un comportamiento eléctrico homogéneo y conductivo, que correspondería con los residuos sólidos urbanos (RSU) 1 a 15 Ohm.m y una zona resistiva con valores superiores a 400 Ohm.m, y dos zonas que presentan un comportamiento eléctrico, de 10 a 40 Ohm.m cuya morfología es arcillosos-arenosos correspondiente a depósitos de rieras.

*El éxito de la prospección geoeléctrica depende no solo del trabajo de campo durante la adquisición de datos, sino de toda una metodología que empieza con la preparación del área prospectada y se extiende hasta el procesamiento e interpretación de los datos.

*Siempre hay que ser consciente de que pueden existir ambigüedades en la interpretación de los resultados. Por lo tanto, es importante considerar el máximo de informaciones adicionales a priori, como, por ejemplo, perfiles de fosos o trincheras e informaciones que provienen de excavaciones previas realizadas en áreas adyacentes a las áreas de estudio, además de informaciones respecto de la vegetación, topografía, tipo de suelo, etc.

6. REFERENCIAS

[1] CALVETTY AMBONI, B. Prospección geoeléctrica aplicada en hidrogeología. Tesis de Maestría en Evaluación Ambiental de Sistemas Hidrológicos. UNLP. Inéd. La Plata. 2005.

[2] ESTUDIO LINEA BASE AMBIENTAL DE LA CUENCA DEL RÍO CHILLON. Ministerio del Ambiente, Lima, Perú. 2010.

[3] Espinosa, Ibáñez, Martinez, Aracil, Maruri, Vallés, Electrical Resistivity Tomography as a technique for studying, 2004.

[4] E. Jorgensen, F. sordergaard. V, Danielsen j. the applicatión of the transient Electromagnetic method in Hydrogeophysical surveys, nota tecnica publicada en la revistas de aplicaciones geofísicas, Marzo 2003, pp22.

[5] ERNESTO ORELLANA, Prospección Geoeléctrica en corriente continua, segunda Ed. Paraninfo, Madrid 1982.

[6] ESPINOSA, A.B. Determinación de contactos en el subsuelo mediante interpretación de perfiles de Tomografía eléctrica. Tesis Doctoral. Universidad de Burgos. 2006

[7] ENRIQUE ARIAS S. LA PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA Y ELECTROMAGNÉTICA EN DOS DIMENSIONES Y SU APLICACIÓN EN LA HIDROGEOLOGÍA, Revista Geológica de América Central, 27: 21-26, 2002.

[8] FELIPE ANDRES DAZA HERNANDEZ. MÉTODOS GEOELÉCTRICOS APLICADOS A LA EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y TERMALES, Tesis de geofísica, Concepción, Chile 2012.

[9] INRENA. Inventario de fuentes aguas subterráneas en el valle del río Chillón. Lima. Perú.2004.

[10] Ing. Edwin N. Mamani Vilcapaza, Propuesta de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua Subterránea, MINISTERIO DEL AMBIENTE VICEMINISTERIO DE GESTIÓN AMBIENTAL, DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD AMBIENTAL lima, Perú 2012.

[11] IEEE Std 81-1983 "Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a GroundSystem".

[12] J. Urbieta, Evaluación de las técnicas de adquisición de datos 2D y 3D con tomografía de resistividad eléctrica en pozo, Tesis de maestría, UNAM. 2009

[13] LOKE, M H. 2001 Tutorial: 2D, 3D electrical imaging surveys Geotomo software, Malasia.

[14] Pérez Parra Guillermo, CARACTERIZACION GEOELECTRICA DEL SUBSUELO PARA EXPLORACION DE AGUAS SUBTERRANEAS AL NORTE DE COJEDES, Universidad Simón Bolívar, Venezuela 2009.

[15] Patiño Hoyos, Arias, Daniel Eduardo; Echeverri Ramírez, Oscar; RELACIONES GEOELECTRICAS EN LA EXPLORACION GEOTECNICA Boletín de Ciencias de la Tierra, núm. 31, 2012, pp. 39-50 Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia

[16] Saad Bakkali, Utilización de sondeos eléctricos para el diagnóstico del potencial hídrico de la región de Tizeght (anti-atlas marroquí) Ingeniería Investigación y Tecnología VII. 2. 71-84, 2006.

[17] SISTEMA DE GESTION AMBIENTAL, NORMA INTERNACIONAL ISO 14001, 2004, Génova, suiza.

[18] ASTM G57-95a “Estandard Test Method for Field measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four- Electrode Method”.

[19] ASTM D 3633-98 “Estandard Test Method For Electrical Resistivity Of Membrane-Pavement Systems”.

[20] ASTM G 71-81 “GuideforConducting and EvaluatingGalvanicCorrosionTests in Electrolytes.”

[21] ASTM G 162 -99 “Standard PracticeforConducting and EvaluatingLaboratoryCorrosionsTests in Soils.