

Universidad de Chile

Proyecto MECESUP UCH 0303

Modernización e Integración Transversal de la Enseñanza de
Pregrado en Ciencias de la Tierra.

Área Temática: Geofísica Aplicada.

Desarrollado por: Joaquín Cáceres.
Emilio Vera.

E-mail: joacacer@ing.uchile.cl
evera@dgf.uchile.cl

Modulo 1: Sondajes Eléctricos Verticales (SEV): Método Galvánico
Tradicional.

Modulo 2: Generación de Perfiles Eléctricos de Resistividad mediante
el uso de Ohmmapper y comparación con el Método
Galvánico.

ÍNDICE.

A.	ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	4
A.1	Variables Físicas del Problema.....	4
A.2	Resistividad en las Rocas.....	5
A.3	Factores que afectan la Resistividad de las Rocas.....	6
A.4	Arreglos de electrodos, Factor Geométrico y Resistividad Aparente.....	7
A.5	Principio Físico de Funcionamiento del Ohmmapper.....	11
A.5.1	Condensador y Corriente Alterna.....	11
A.5.2	Acoplamiento Capacitivo.....	15
A.6	Profundidad de Investigación.....	17
A.7	Interpretación de Pseudosecciones de Resistividad.....	20
A.7.1	Interpretación de Sondajes Eléctricos Verticales (SEV).....	20
A.7.2	Interpretación de Pseudosecciones de Resistividad.....	22

Modulo 1: Sondajes Eléctricos Verticales (SEV): Método Galvánico Tradicional.

1.1	ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	4
1.2	EXPERIENCIA PRÁCTICA.....	27
1.2.1	Objetivos.....	27
1.2.2	Equipamiento.....	27
1.2.3	Metodología.....	29
1.2.3.1	Descripción del Terreno.....	29
1.2.3.2	Geometría de Adquisición de Datos.....	29
1.3	GUÍA DE TRABAJO	30
1.3.1	Guía para el Profesor.....	30
1.3.1.1	Procedimiento de Adquisición de Datos.....	30
1.3.1.2	Análisis e Interpretación de Datos.....	32
1.3.1.3	Ejemplos de otras experiencias.....	36
1.3.2	Guía para el Alumno.....	40
1.3.2.1	Procedimiento de Adquisición de Datos.....	40
1.3.2.2	Análisis e Interpretación de Datos.....	41
1.4	RECOMENDACIONES.....	42
1.4.1	Medidas de Seguridad.....	42
1.4.2	Guardado y Limpieza del Equipo.....	42
1.4.3	Confección de Informe.....	42
1.4.4	Desarrollo del Módulo	42

Modulo 2: Generación de Perfiles Eléctricos de Resistividad mediante el uso de Ohmmapper y Comparación con el Método Galvánico.

2.1	ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	4
2.2	EXPERIENCIA PRÁCTICA.....	43
2.2.1	Objetivos.....	43
2.2.2	Equipamiento.....	44
2.2.2.1	Descripción del Equipo.....	44
2.2.2.2	Ensamble del Equipo. (Esquemático).....	47
2.2.3	Metodología.....	47
2.2.3.1	Descripción del Terreno.....	47
2.2.3.2	Geometría de Adquisición de Datos.....	48
2.3	GUÍA DE TRABAJO.....	49
2.3.1	Guía para el Profesor.....	49
2.3.1.1	Ensamble del Equipo (Detallado).....	49
2.3.1.2	Configuración Inicial del Equipo.....	50
2.3.1.3	Procedimiento de Adquisición de Datos.....	51
2.3.1.4	Transferencia e Inversión de Datos.	53
2.3.1.5	Resultados de la Experiencia.....	54
2.3.1.6	Comparación entre el Ohmmapper y el Método Galvánico...58	
2.3.2	Guía para el Alumno.....	65
2.3.2.1	Procedimiento de Adquisición de Datos.....	65
2.3.2.2	Análisis e Interpretación de Datos.....	66
2.4	RECOMENDACIONES.....	67
2.4.1	Medidas de Seguridad.....	67
2.4.2	Guardado y Limpieza del Equipo.....	67
2.4.3	Confección de Informe.....	67
2.4.4	Desarrollo del Módulo.....	68

A. ANTECEDENTES TEÓRICOS.

A.1 Variables Físicas del Problema.

Las variables físicas que se utilizan para comprender las propiedades eléctricas del medio y la metodología de medición de éstas son básicamente: el Voltaje, la Intensidad de Corriente y la Resistencia.

El **Voltaje (V)** o Fuerza Electromotriz es la causante del movimiento de cargas a través de un medio, su unidad de medida es el volt [v]. La tasa a la cual estas cargas pasan a través de una sección, o también llamado flujo de electrones, se denomina Corriente o **Intensidad de Corriente (I)** y su unidad de medida es el ampere [amp].

Este flujo de electrones producido por la fuerza electromotriz provoca fricción en el medio por el cual estas cargas fluyen, a esta capacidad de producir fricción o impedir el movimiento de cargas se le denomina **Resistencia (R)** y su unidad de medida es el ohm [Ω]. Existe una relación entre estas tres variables que esta dada por la Ley de Ohm:

$$R I = V$$

Distintos materiales ofrecen distintas resistencia al flujo de electrones que pasa a través de ellos. Por ejemplo un alambre de cobre deja pasar más fácilmente la corriente que un alambre de hierro, es decir, el hierro ofrece una mayor resistencia al flujo de electrones. Esta diferencia es debida a una propiedad intrínseca de cada material que se denomina **Resistividad (ρ)** y su unidad de medida es [ohm-m]. Una amplia gama de métodos eléctricos usados en prospección geofísica, apuntan a la medición de la resistividad de los materiales del subsuelo. La interpretación de estos datos pretende una caracterización del medio geológico en cuestión, en base a su resistividad eléctrica.

A.2 Resistividad de las rocas.

Una roca, en general, se comporta como un aislante eléctrico con resistividades eléctricas del orden de $10^5 - 10^7$ [Ωm], exceptuando el caso de algunos metales de ocurrencia extraña con resistividades del orden de $10^{-5} - 10^{-7}$ [Ωm] (La resistividad del cobre comercial por ejemplo es 1.72×10^{-8} [Ωm]).

La resistividad de una roca no depende solo de su litología, sino que también su capacidad de alojar en sus poros, soluciones salinas que favorezcan la conducción eléctrica a través de iones en solución. Para la resistividad de una roca, resultan entonces importantes factores como su porosidad, salinidad de las soluciones, compactación, y variables de ambiente como presión y temperatura. La resistividad en las rocas varía entonces en un amplio rango dependiendo de cómo interactúen las variables antes mencionadas.

La figura A.1 presenta un diagrama con valores de resistividad de distintos medios geológicos.

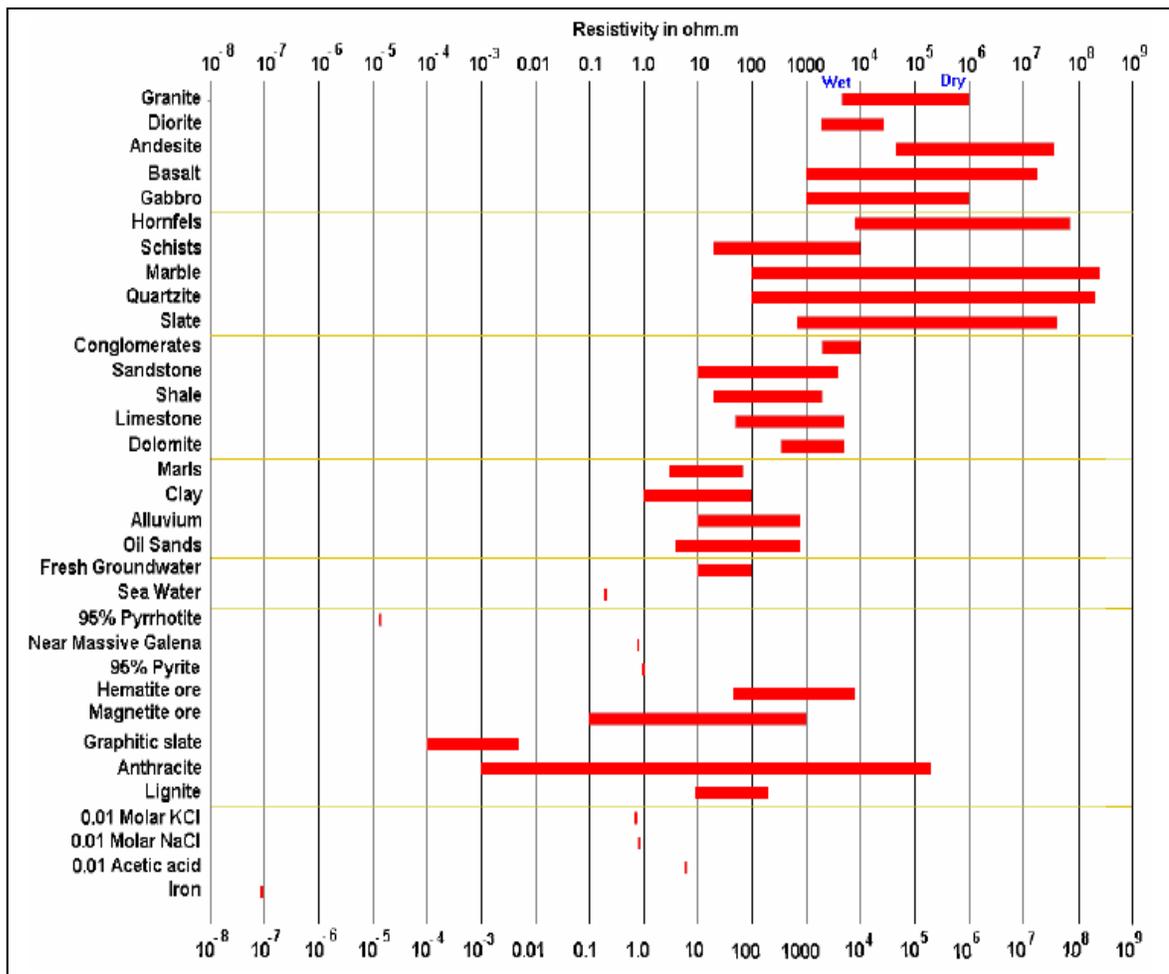


Figura A.1: Resistividad en distintos medios geológicos comunes.

A.3 Factores que afectan la Resistividad de las Rocas.

Porosidad: es el cociente entre el Volumen de Poros y el Volumen total. En ambientes someros cerca de la superficie terrestre, la porosidad de las rocas está ocupada por soluciones acuosas que facilitan la conducción iónica. La resistividad eléctrica disminuye con mayor interconexión entre poros, y en general se tiene que a mayor porosidad efectiva menor es la resistividad.

Salinidad de las soluciones acuosas: a mayor salinidad de las soluciones, mayor es el contenido de iones que pueden conducir corriente eléctrica.

Porcentaje de Saturación: es el porcentaje del Volumen de Poros ocupado por Soluciones Acuosas. Si los poros no están ocupados por soluciones acuosas, el medio tendrá una mayor resistividad. La resistividad disminuye con el grado de saturación según la Ley de Archie:

$$\frac{\rho}{\rho_{100}} = a\phi^{-m}S^{-n}$$

donde ρ_{100} = resistividad de máxima saturación.

n = número entero (~ 2).

m, a = constantes en rango variable, dependen del tipo de roca.

(0.5 < a < 2.5; 1.3 < m < 2.5)

ϕ = porosidad.

S = saturación.

Temperatura: a mayor temperatura, disminuye la viscosidad de las soluciones acuosas, facilitando la movilidad de los iones y por lo tanto, disminuye la resistividad.

Presión: Para rocas sedimentarias, a mayor Presión, aumenta el grado de compactación, disminuyendo la porosidad y aumentando potencialmente la resistividad. Mientras que para rocas muy compactas (rocas ígneas y metamórficas) la presión provoca fracturamiento, disminuyendo potencialmente la resistividad de las rocas.

A.4 Arreglos de Electrodo, Factor Geométrico y Resistividad Aparente.

La determinación de la resistividad del subsuelo, requiere medir la respuesta de éste a una perturbación eléctrica conocida que podemos controlar a voluntad. Esto se consigue inyectando corriente al medio, y midiendo en forma independiente el campo eléctrico que ella genera a través de diferencias de potencial (voltaje) entre diversos puntos del medio. Para inyectar corriente, normalmente se usan dos electrodos C1 y C2 ubicados en la superficie y conectados a una fuente de poder.

La intensidad de corriente se mide con un amperímetro conectado en serie. La medida de diferencias de potencial entre puntos del medio se lleva a cabo mediante electrodos independientes P1 y P2 también en la superficie y conectados a un voltímetro. La Figura A.2 muestra esquemáticamente un arreglo de electrodos típico (dipolo-dipolo) usado en prospección geoelectrica, con igual separación (a) para los electrodos (dipolo) de corriente y potencial, y una separación na entre ellos. El flujo de corriente irá desde el electrodo C1 al electrodo C2, y alrededor de cada uno de ellos se creará un campo eléctrico con líneas equipotenciales concéntricas (Figura A.3a). El resultado final será la suma de la contribución de ambos electrodos, uno positivo y otro negativo, como muestra la Figura A.3b.

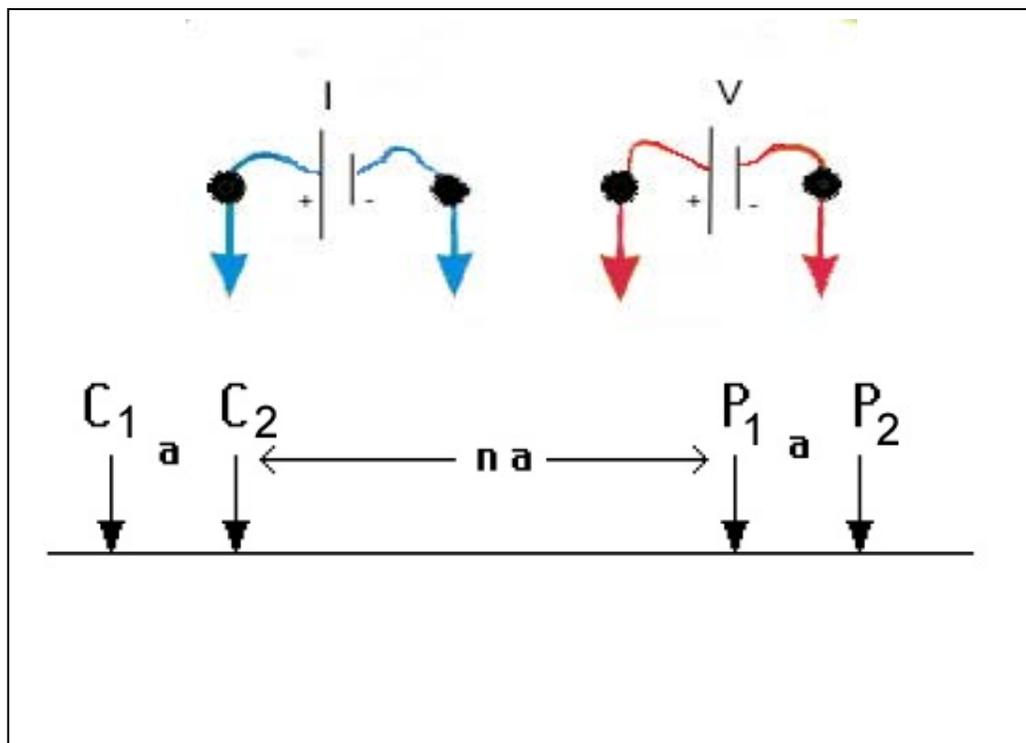


Figura A.2: Arreglo de electrodos dipolo-dipolo.

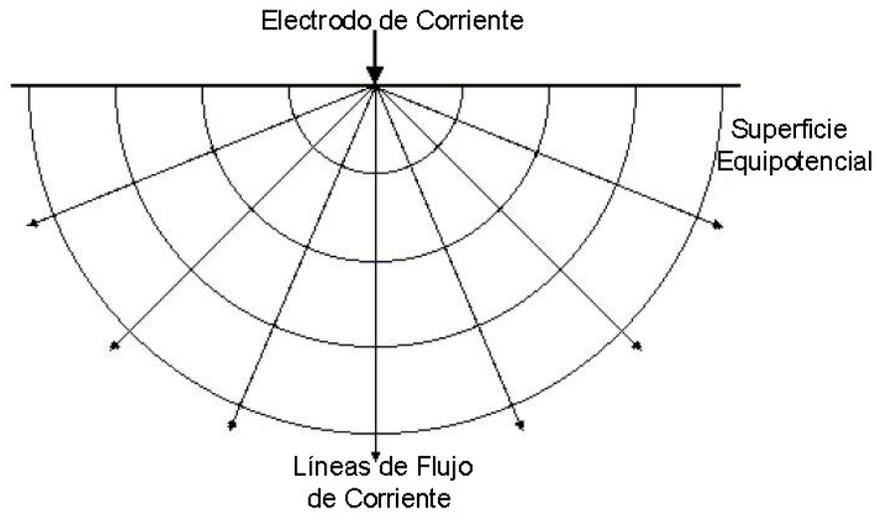


Figura A.3a: Líneas de Flujo y Equipotenciales en torno a un electrodo de corriente en la superficie de un semiespacio homogéneo.

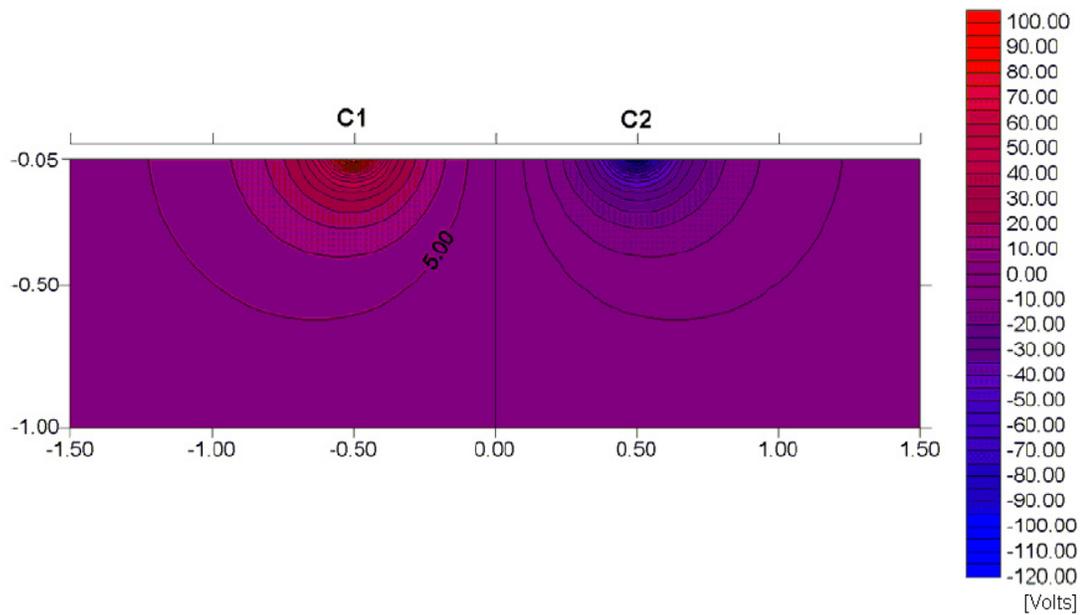


Figura A.3b: Equipotenciales (Volts) para un semiespacio homogéneo de 1 Ohm-m, un flujo de corriente de 1 A, y electrodos de corriente separados por 1 m.

Utilizando teoría electromagnética básica, se demuestra que para electrodos de corriente y potencial ubicados en la superficie de un semiespacio homogéneo de resistividad constante ρ , la diferencia de voltaje V medida entre los electrodos de potencial P1 y P2 es:

$$V = \frac{\rho I}{k}$$

Donde I es la corriente que circula entre los electrodos de corriente C1 y C2, y k es el “factor geométrico” que depende de las distancias entre los electrodos de corriente y potencial r_{C1P1} , r_{C2P1} , r_{C1P2} , r_{C2P2} , que viene dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right)}$$

Entonces, medidos ciertos valores de corriente I y voltaje V , la resistividad eléctrica del medio viene dada por:

$$\rho = k \frac{V}{I}$$

Si el medio es efectivamente homogéneo, el valor de resistividad dado por esta última ecuación es el valor verdadero. Si el medio es heterogéneo, sin embargo, el valor de resistividad dado por esta ecuación es solo un valor de **resistividad aparente** ρ_a que en general representa algún tipo de promedio de las diferentes resistividades presentes en el medio.

Existen diversos arreglos de electrodos y por consiguiente un factor geométrico para cada uno de ellos. En la figura A.4 se muestran los más utilizados.

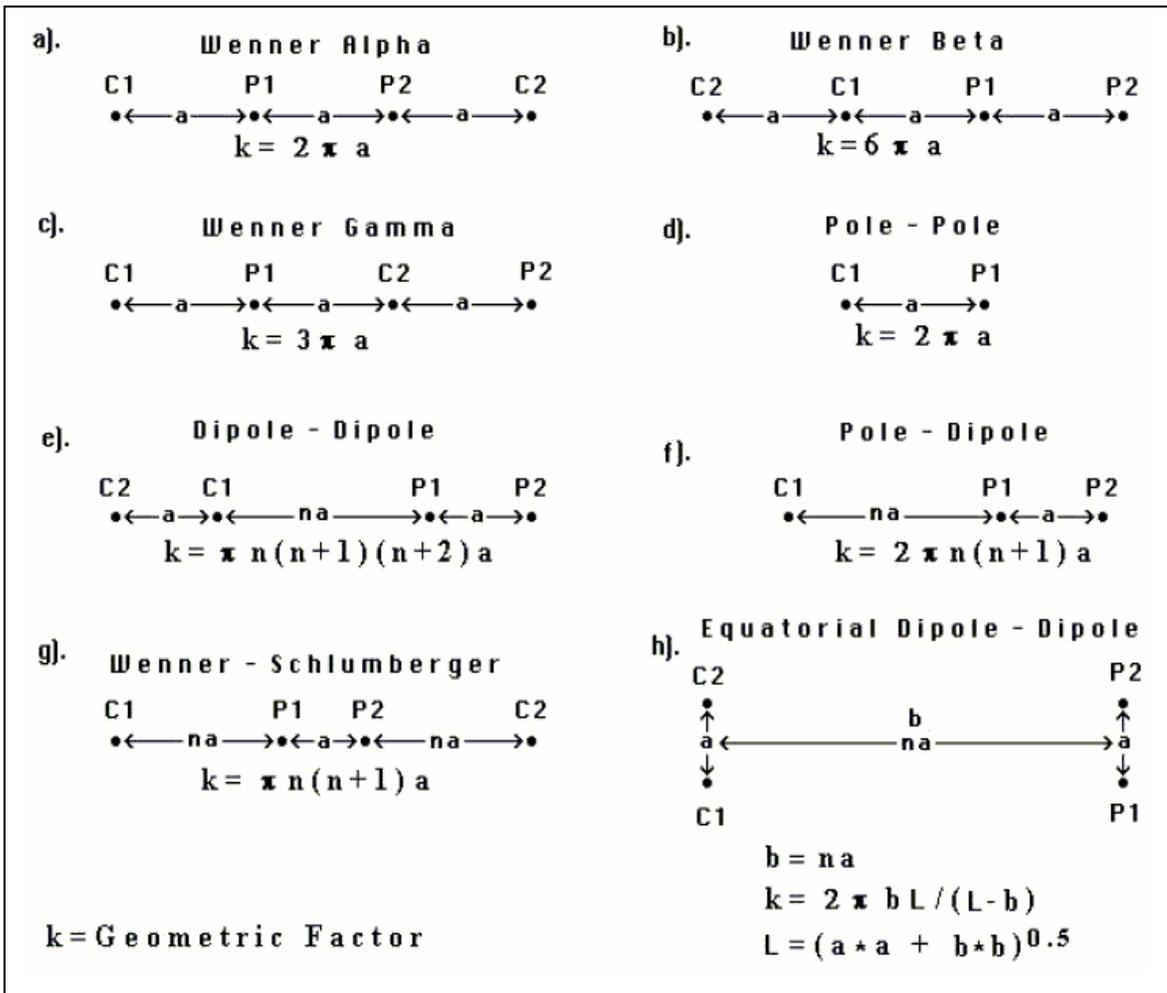


Figura A.4: Arreglos de electrodos más utilizados con su respectivo factor geométrico.

A.5 Principio de Funcionamiento del Ohmmapper.

El arreglo de electrodos utilizado por el Ohmmapper es similar a un arreglo dipolo-dipolo, donde el transmisor inyecta corriente al suelo, asemejando a los electrodos de corriente, mientras que el receptor mide la diferencia de potencial, cumpliendo las funciones de los electrodos de potencial (ver Fig. A.5).

Lo que diferencia al Ohmmapper de los métodos tradicionales de medición, es la **no conexión física** del instrumento con el medio, es decir, no hay electrodos clavados al suelo por donde se inyecte corriente o se mida voltaje.

El principio de funcionamiento, es el **acoplamiento capacitivo** que existe entre los cables electrodos del instrumento y el medio en estudio. Este principio se utiliza, tanto como para inyectar corriente al medio, como para medir la respuesta de éste. Para comprender el acoplamiento capacitivo, utilizado por el Ohmmapper, es necesario introducir algunos conceptos eléctricos adicionales como lo es la respuesta de un Condensador a la aplicación de una Corriente Alterna.

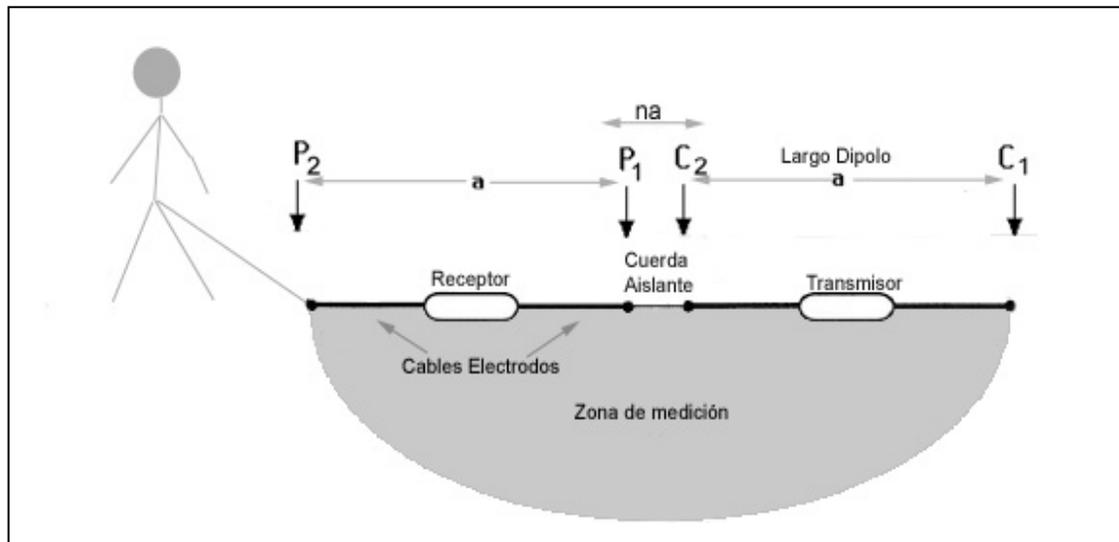


Figura A.5: Arreglo Dipolo-Dipolo para el Ohmmapper.

A.5.1 Condensador y Corriente Alterna.

El condensador es un dispositivo eléctrico que almacena cargas eléctricas, constituido por un material aislante en medio de dos placas conductoras. La carga almacenada (Q) en cada placa es proporcional a la diferencia de potencial (V) entre éstas, donde la constante de proporcionalidad se denomina **Capacitancia** (C) y se define como la capacidad del Condensador de almacenar cargas eléctricas. Su unidad de medida es el Faraday ($Farad = [Coulomb \cdot Volt]$).

$$Q = C \cdot V$$

En el momento de carga y descarga del condensador, una placa induce una corriente eléctrica o flujo de cargas en la otra. Esto se logra debido a que las dos placas están lo suficientemente cerca una de la otra.

Al aplicar una Corriente Alterna (CA), que produce una diferencia de potencial alterna entre las placas del condensador, se logra que el condensador se cargue y descargue en una y otra dirección, produciendo así, un flujo permanente de cargas de una placa a otra.

El condensador presentará una oposición al paso de corriente alterna que se denominará **Reactancia Capacitiva** que es equivalente a una Resistencia. Esta oposición es de carácter electrostático, es decir, la carga almacenada en el condensador se opone a que éste siga cargándose y esta oposición será mayor cuanto más carga acumule el condensador. Por lo tanto cuando el condensador está totalmente descargado, esta oposición, se comporta como un cortocircuito y, cuando está totalmente cargado, se comporta como una resistencia de valor infinito. Para valores intermedios de carga se comportará como una resistencia de valor intermedio, limitando la corriente a un determinado valor.

Como se mencionó anteriormente, el condensador está continuamente cargándose y descargándose, mientras más lentamente varíe el Voltaje (frecuencia baja), más tiempo estará el condensador en estado de casi carga que en estado de casi descarga, con lo que presentará una oposición alta al paso de la corriente. Mientras que para variaciones rápidas del Voltaje (frecuencias altas) el efecto será el contrario y, por tanto, presentará una oposición baja al paso de la corriente. La Reactancia Capacitiva se puede calcular como:

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

donde f es la frecuencia de la CA y C la Capacidad del Condensador.

Al igual que una Resistencia, cumple la Ley de Ohm

$$X_c = V/I$$

En la Figura A.6 se presenta un gráfico de la variación de la Corriente en un circuito con un Condensador de 1000 [μ F] y un Voltaje Alterno sinusoidal con una Amplitud (V_o) de 10 [v] y una frecuencia $f = 50$ [Hz].

$$V = V_o \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (\text{Voltaje en función del tiempo}).$$

$$I = \frac{V_o}{X_c} \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t + \pi/2) \quad (\text{Corriente en función del tiempo}).$$

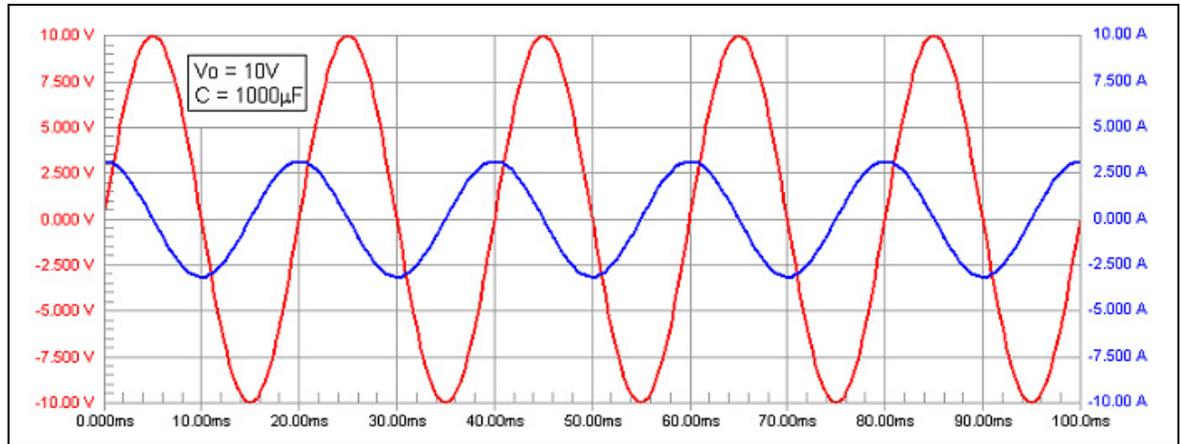


Figura A.6: Variación temporal de la Corriente y Voltaje en un condensador.

En la figura anterior podemos notar que la Corriente esta “adelantada” en un desfase $\pi/2$ de la diferencia de Potencial.

Un circuito más real es el que se compone de una Resistencia y de un Condensador conectados en serie (ver Fig. A.7), por lo que se introduce un nuevo concepto denominado **Impedancia (Z)** que es la suma de la Resistencia y de la Reactancia Capacitiva.

$$Z = R + X_c$$

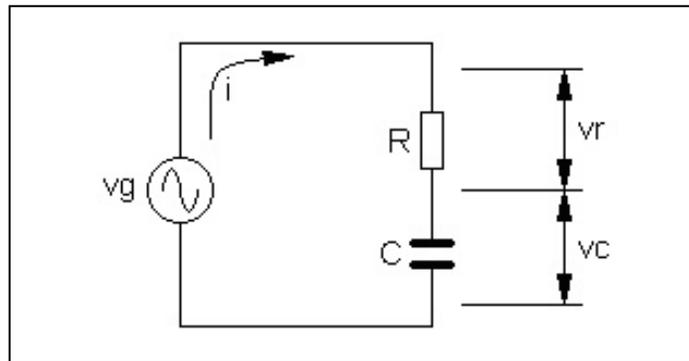


Figura A.7: Circuito RC en serie.

La Figura A.8 muestra la corriente (i), voltaje alterno de alimentación (v_g), y el voltaje entre las placas del Condensador (v_c) para un caso donde $R = 3 \text{ } [\Omega]$, $C = 100 \text{ } [\mu\text{F}]$, $f = 1 \text{ } [\text{kHz}]$, y una amplitud $V_0 = 10 \text{ } [\text{v}]$ para el Voltaje de alimentación (v_g). La corriente esta “adelantada” en un ángulo $\phi \neq 90^\circ$ con respecto al Voltaje de Alimentación, en un ángulo $\phi = 90^\circ$ con respecto al Voltaje del Condensador (v_c), y en fase con respecto al Voltaje de la Resistencia.

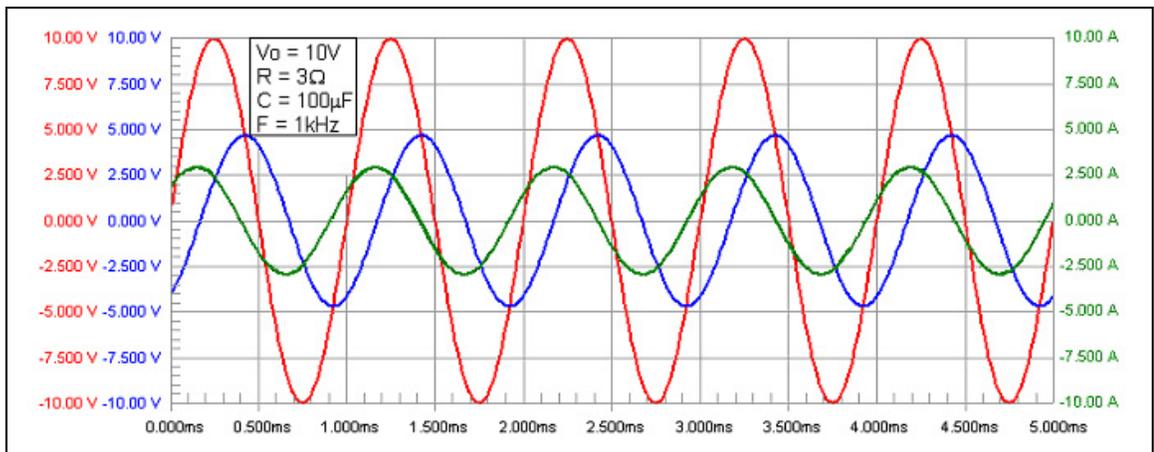


Figura A.8: Corriente (i) (verde), el Voltaje de Alimentación (v_g) (rojo) y el Voltaje entre las placas del Condensador (v_c) (azul) para un circuito RC en serie.

La corriente (i) esta “adelantada” en un ángulo $\phi \neq 90^\circ$ con respecto al Voltaje de Alimentación (v_g), en un ángulo $\phi = 90^\circ$ con respecto al Voltaje del Condensador (v_c) y en fase con respecto al Voltaje de la Resistencia.

A.5.2 Acoplamiento Capacitivo.

El acoplamiento capacitivo consiste en el acople entre los cables electrodos y la superficie del medio para conformar un Condensador o Capacitor, donde el escudo coaxial del cable electrodo que cubre el centro conductor actúa como una placa del Condensador, mientras que la superficie del medio es la otra placa, en medio de éstas, está la cubierta de plástico del cable que actúa como el centro aislante del Condensador. La figura A.9 muestra la analogía entre un condensador y el acople capacitivo antes mencionado.

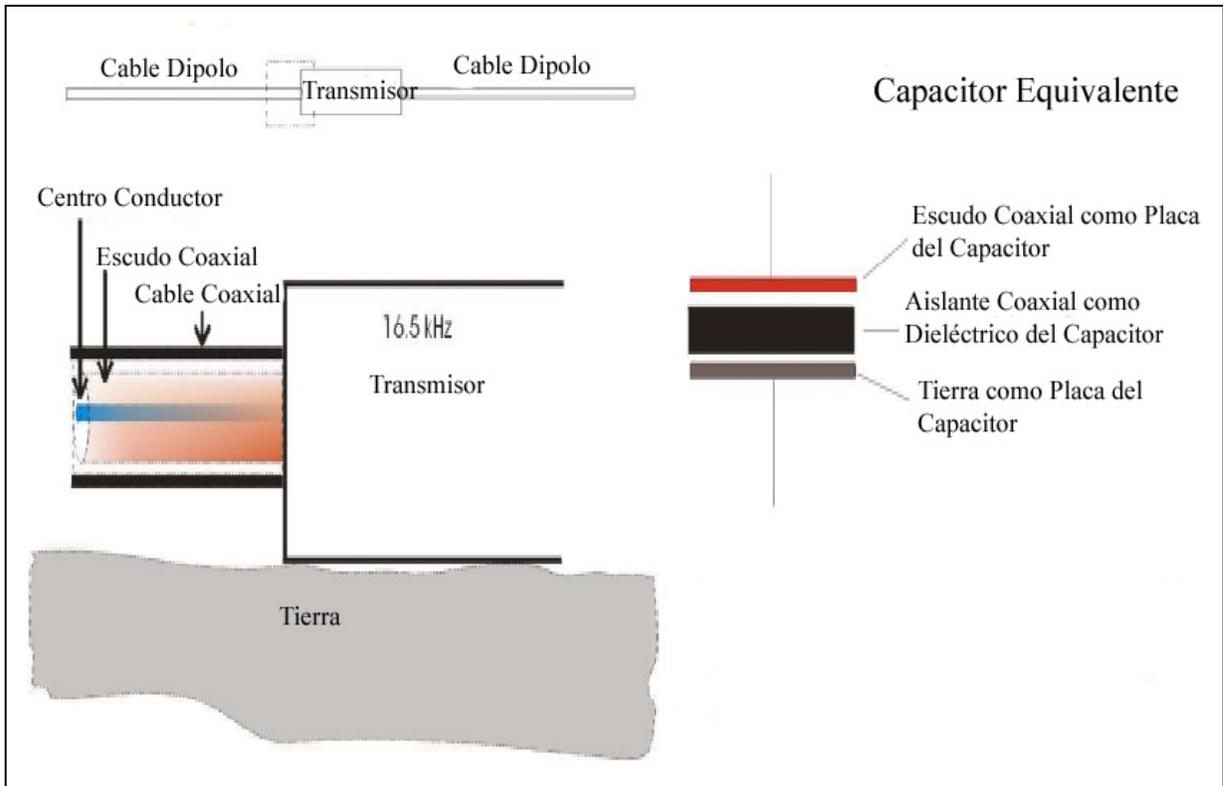


Figura A.9: Acoplamiento Capacitivo entre los Cables Electrodo y la superficie del medio en estudio y su Condensador Equivalente.

El Transmisor emite una Corriente Alterna de 16 kHz de frecuencia para que el Condensador Equivalente este siempre en carga y descarga. Esto permite la inyección permanente de Corriente (Alterna) al medio en estudio.

La Capacitancia de este Condensador Equivalente esta determinada en primer orden por el largo del cable electrodo, así, a mayor longitud del cable electrodo, mayor Capacitancia y por lo tanto mayor capacidad para acoplar corriente al medio.

Tanto, los cables electrodos conectados al transmisor, como al receptor, conforman este Condensador Equivalente, el primero, para inyectar corriente al medio y el segundo, para recibir esta corriente y medir la diferencia de potencial. Por medio de una señal de baja frecuencia (2 kHz), el transmisor le envía al receptor, la información de la corriente que esta transmitiendo. Así el receptor tiene ambas informaciones, la diferencia de potencial medida por él (en μV) y la corriente inyectada al medio por el transmisor medida en mA. Además si se considera la información de la geometría del arreglo de electrodos ingresada en el equipo, se puede realizar el cálculo de la resistividad aparente del medio.

Los cables electrodos conectados al transmisor y receptor se denominan "electrodos lineales", ya que actúan a lo largo de todo el cable y no solamente en un punto como en el caso de los electrodos tradicionales. Para que esto ocurra se necesita que los cables electrodos tengan una resistencia muy baja, sean homogéneos, el diámetro sea constante y que el Voltaje requerido para que la corriente pase a través del electrodo al medio sea mucho más grande que el Voltaje requerido para producir un flujo de corriente al interior del éste. Por esto el centro conductor esta hecho de cobre y la manufacturación de éste, debe ser de calidad.

Con estas condiciones se tiene entonces que, tanto la Capacitancia, como la reactancia Capacitiva por unidad de largo son constantes a través de todo el electrodo, y por consiguiente, la corriente por unidad de largo también lo es.

Cualquier inhomogeneidad en el cable electrodo producirá una inhomogeneidad en la inyección de corriente y por consiguiente la geometría del arreglo de electrodos no será la misma que la considerada para el equipo, por lo tanto la medida de resistividad estará distorsionada.

A.6 Profundidad de Investigación.

La Profundidad de Investigación es la profundidad a la que se puede inyectar corriente al medio y obtener un resultado confiable de la resistividad de éste. Depende del arreglo de electrodos y de la separación entre éstos (parámetro a, ver Figura A.4). En la Figura A.10 se muestra como varía la profundidad de investigación, normalizada por el parámetro a y por el largo del arreglo, en función del tipo de arreglo de electrodos. También se muestra el cálculo del factor geométrico, tomando el parámetro a igual a 1 m. Por ejemplo para un arreglo dipolo-dipolo, si la máxima separación (a) entre los electrodos es de 5 m, y el máximo factor n es de 6, entonces el largo total del arreglo será de 40 m. y por lo tanto, la profundidad de investigación máxima se calculará como 40×0.216 , aproximadamente igual a 8.5 m.

Para el caso del Ohmmapper, la Profundidad de Investigación, además de depender de los parámetros antes mencionados, depende de la resistividad del medio. Para medios poco resistivos, se convierte en una limitante debido al efecto electromagnético. Se define como "Skin Depth" a la máxima profundidad de investigación producto del efecto electromagnético.

Como es sabido, un flujo de corriente produce un campo magnético, si se cambia el sentido de este flujo de corriente, se produce un campo magnético en sentido opuesto al anterior. De acuerdo con la ley de Inducción de Faraday por otro lado, un campo magnético variable induce fuerza electromotriz (diferencia de voltaje) y en definitiva un flujo de corriente. Al igual que el caso anterior si el campo magnético se invierte el flujo de corriente también lo hará.

Un cambio en el flujo de corriente en un alambre, cambiará el campo magnético asociado y éste cambio a su vez, inducirá un voltaje en el alambre. Según la ley de Lenz, la dirección del voltaje inducido se opondrá al cambio de corriente original. La tendencia de un cambio de corriente a crear un voltaje opuesto se denomina **Inductancia** y su unidad de medida es el Henry.

Para el caso de una reactancia capacitiva y de un voltaje CA este efecto es llamado **reactancia inductiva** (X_L)

$$X_L = 2 \pi f L$$

donde X_L = Reactancia en Ohms

f = frecuencia en Hz.

L = Inductancia en Henrys.

La Reactancia Inductiva, tal como una Resistencia, cumple la Ley de Ohm.

$$X_L I = V$$

Array type	z_e/a	z_e/L	Geometric Factor	Inverse Geometric Factor (Ratio)
Wenner Alpha	0.519	0.173	6.2832	0.15915 (1.0000)
Wenner Beta	0.416	0.139	18.850	0.05305 (0.3333)
Wenner Gamma	0.594	0.198	9.4248	0.10610 (0.6667)
Dipole-dipole n = 1	0.416	0.139	18.850	0.05305 (0.3333)
n = 2	0.697	0.174	75.398	0.01326 (0.0833)
n = 3	0.962	0.192	188.50	0.00531 (0.0333)
n = 4	1.220	0.203	376.99	0.00265 (0.0166)
n = 5	1.476	0.211	659.73	0.00152 (0.0096)
n = 6	1.730	0.216	1055.6	0.00095 (0.0060)
n = 7	1.983	0.220	1583.4	0.00063 (0.0040)
n = 8	2.236	0.224	2261.9	0.00044 (0.0028)
Equatorial dipole-dipole				
n = 1	0.451	0.319	21.452	0.04662 (0.2929)
n = 2	0.809	0.362	119.03	0.00840 (0.0528)
n = 3	1.180	0.373	367.31	0.00272 (0.0171)
n = 4	1.556	0.377	841.75	0.00119 (0.0075)
Wenner - Schlumberger				
n = 1	0.519	0.173	6.2832	0.15915 (1.0000)
n = 2	0.925	0.186	18.850	0.05305 (0.3333)
n = 3	1.318	0.189	37.699	0.02653 (0.1667)
n = 4	1.706	0.190	62.832	0.01592 (0.1000)
n = 5	2.093	0.190	94.248	0.01061 (0.0667)
n = 6	2.478	0.191	131.95	0.00758 (0.0476)
n = 7	2.863	0.191	175.93	0.00568 (0.0357)
n = 8	3.247	0.191	226.19	0.00442 (0.0278)
n = 9	3.632	0.191	282.74	0.00354 (0.0222)
n = 10	4.015	0.191	345.58	0.00289 (0.0182)
Pole-dipole n = 1	0.519		12.566	0.07958 (0.5000)
n = 2	0.925		37.699	0.02653 (0.1667)
n = 3	1.318		75.398	0.01326 (0.0833)
n = 4	1.706		125.66	0.00796 (0.0500)
n = 5	2.093		188.50	0.00531 (0.0334)
n = 6	2.478		263.89	0.00379 (0.0238)
n = 7	2.863		351.86	0.00284 (0.0178)
n = 8	3.247		452.39	0.00221 (0.0139)
Pole-Pole	0.867		6.28319	0.15915 (1.0000)

Figura A.10: Profundidad de Investigación z_e , normalizada por el parámetro a y el largo (L) del arreglo de electrodos, y factor geométrico para $a = 1m.$, para distintos arreglos de electrodos.

El flujo de corriente CA causado por el Ohmmapper produce un pequeño Voltaje que gracias a la Ley de Lens sabemos que trata de evitar el flujo de corriente CA.

La corriente que fluye en la parte más superficial del suelo crea un Voltaje que tiende a bloquear la corriente que viene fluyendo desde partes más profundas. En suelos muy resistivos, el voltaje creado por una corriente que fluye al interior del medio es mucho más grande comparado con el voltaje causado por la inductancia del medio, por esta razón el "skin depth" no es un problema en terrenos muy resistivos. En cambio en suelos no muy resistivos el voltaje creado por la inductancia puede ser lo suficientemente grande para reducir el flujo de corriente que viene de profundidad.

Una buena aproximación del "Skin Depth" es:

$$SK = 500\sqrt{(\rho/f)}$$

Donde ρ es la resistividad del medio y f la frecuencia de transmisión (16.5 [KHz] para el caso del Ohmmapper). En la Figura A.11 se presenta un gráfico de la variación del "Skin Depth" según la resistividad del medio para una frecuencia de transmisión de 16 [kHz].

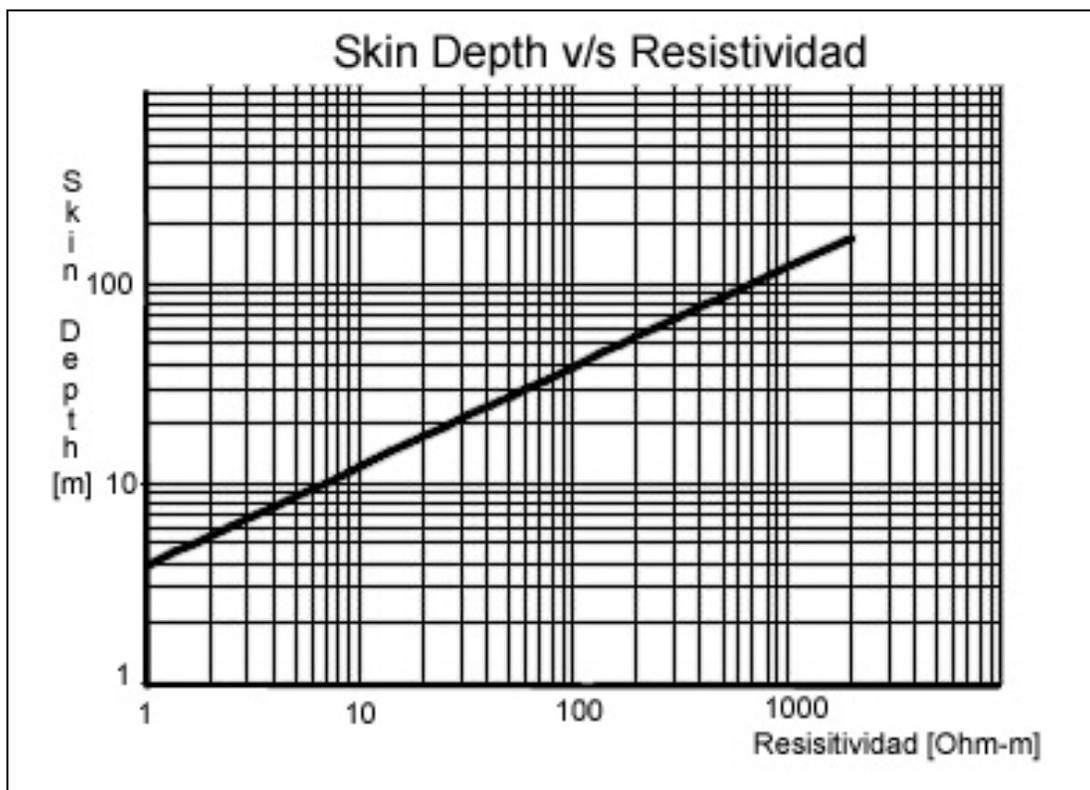


Figura A.11: "Skin Depth" en función de la resistividad del medio.

A.7 Interpretación de Datos.

La interpretación de los datos obtenidos en terreno depende del tipo de instrumento utilizado y de la geometría de adquisición de datos, asumiendo supuestos para cada caso.

A.7.1 Interpretación de Sondajes Eléctricos Verticales (SEV).

Un Sondaje Eléctrico Vertical, como su nombre lo dice, es un conjunto de medidas tomadas en un mismo punto en la superficie, pero a distinta profundidad, obteniendo distintas medidas de resistividad aparente. Independientemente del arreglo de electrodos utilizados, esté esta centrado siempre en un mismo punto (sobre el cual se desea realizar el SEV) y la profundidad de la medida depende de la separación entre los electrodos.

Para interpretar los datos de un SEV se tiene que asumir un modelo de capas del medio en estudio (Modelo Unidimensional), es decir, que la resistividad varía solo en profundidad y no lateralmente, un supuesto importante, ya que no todos los medios se comportan de esta manera. Otra consideración importante es que los valores de resistividad aparente son en realidad un promedio de las resistividades reales del medio, por lo que por ejemplo un alto valor de resistividad aparente, en general, estará subestimando un valor de resistividad real.

Una información importante que se puede extraer de un SEV es un cambio de resistividad del medio que se verá reflejado en un cambio en las medidas de resistividad aparente, aunque solo la inversión de los datos puede dar una información más confiable de la profundidad a la que ocurre este cambio.

La inversión de los datos de resistividad aparente es un complejo proceso matemático con el cual se obtiene un modelo de la distribución de resistividad real en el medio.

La figura A.12 muestra un ejemplo de un Modelo Unidimensional para interpretar los datos de un SEV, notar la subestimación de los valores de resistividad por parte de las medidas y el cambio de resistividad reflejado en los datos que alcanzan un máximo y luego decaen.

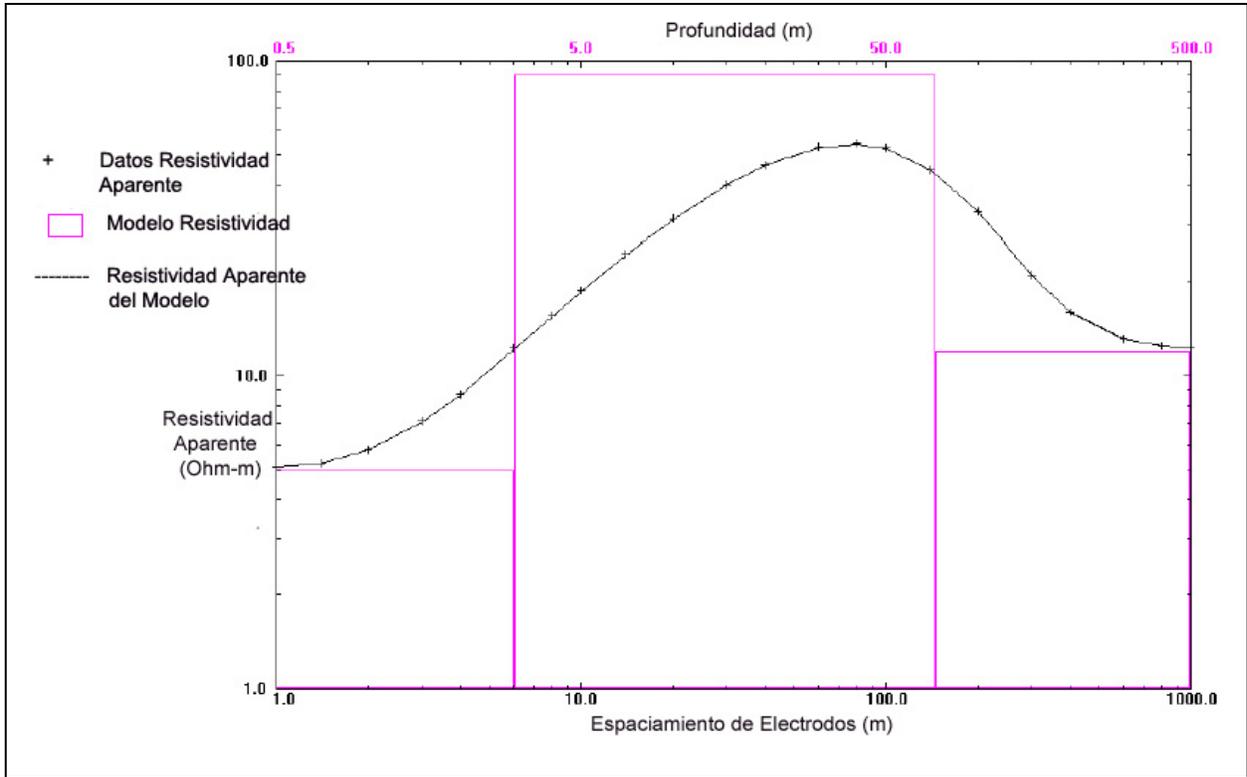


Figura A.12: Modelo Unidimensional para medidas tomadas por un SEV.

A.7.2 Interpretación de Pseudosecciones de Resistividad.

Una Pseudosección de Resistividad es un conjunto de medidas de Resistividad Aparente que conforman un arreglo en dos dimensiones, es decir, un perfil de resistividad. Puede ser construida uniendo distintos SEV equiespaciados unos de otros con datos a igual profundidad. La figura A.13 muestra un ejemplo de la construcción de una pseudosección con un arreglo Wenner. En este ejemplo se puede notar el gran número de medidas necesarias para la construcción de la pseudosección y por consiguiente el largo tiempo y trabajo empleado, sobre todo por el tipo de arreglo escogido.

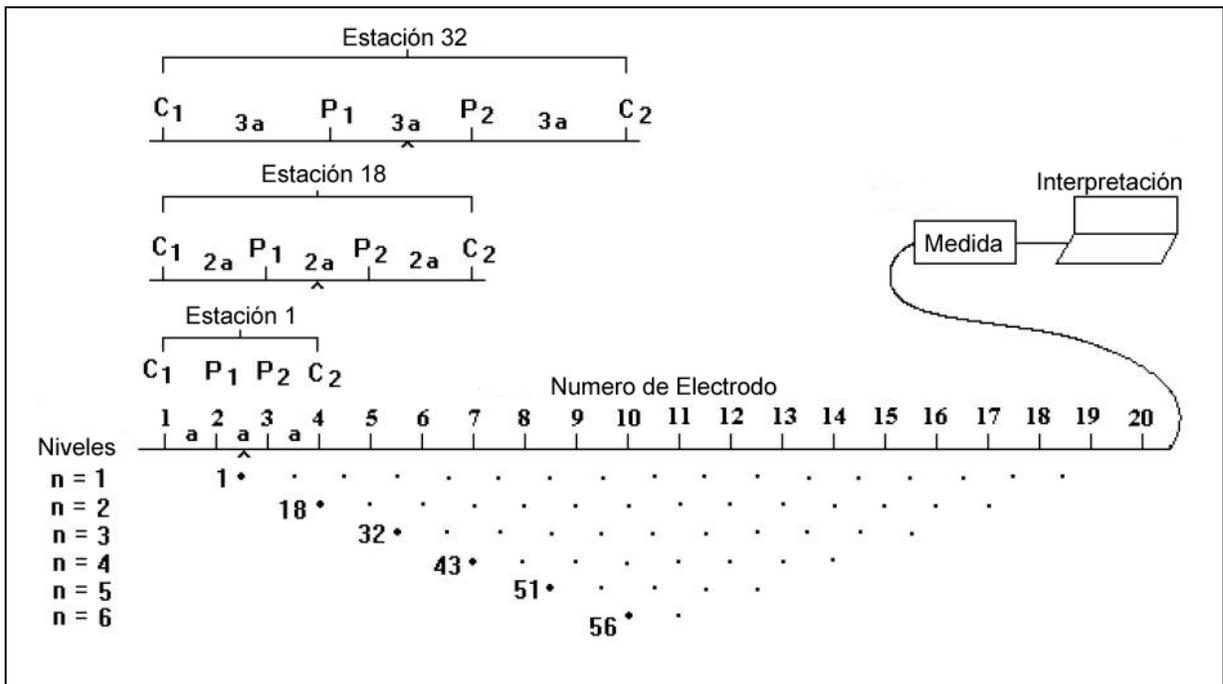


Figura A.13: Construcción de una pseudosección utilizando un arreglo de Wenner.

El ohmmapper puede realizar estas medidas mucho más fácil y rápido, obteniendo además pseudosecciones de mayor detalle e incluso medidas sobre una grilla de puntos, pudiendo realizar así, un modelo tridimensional del medio.

La figura A.14 muestra un ejemplo de una pseudosección obtenida con el Ohmmapper (figura superior), del modelo bidimensional de resistividad obtenido por la inversión de los datos (figura inferior) y de la pseudosección teórica que representa al modelo (figura central). Notar la igualdad de las pseudosecciones y nuevamente la subestimación y sobreestimación de los valores de resistividad de la pseudosección comparada con el modelo.

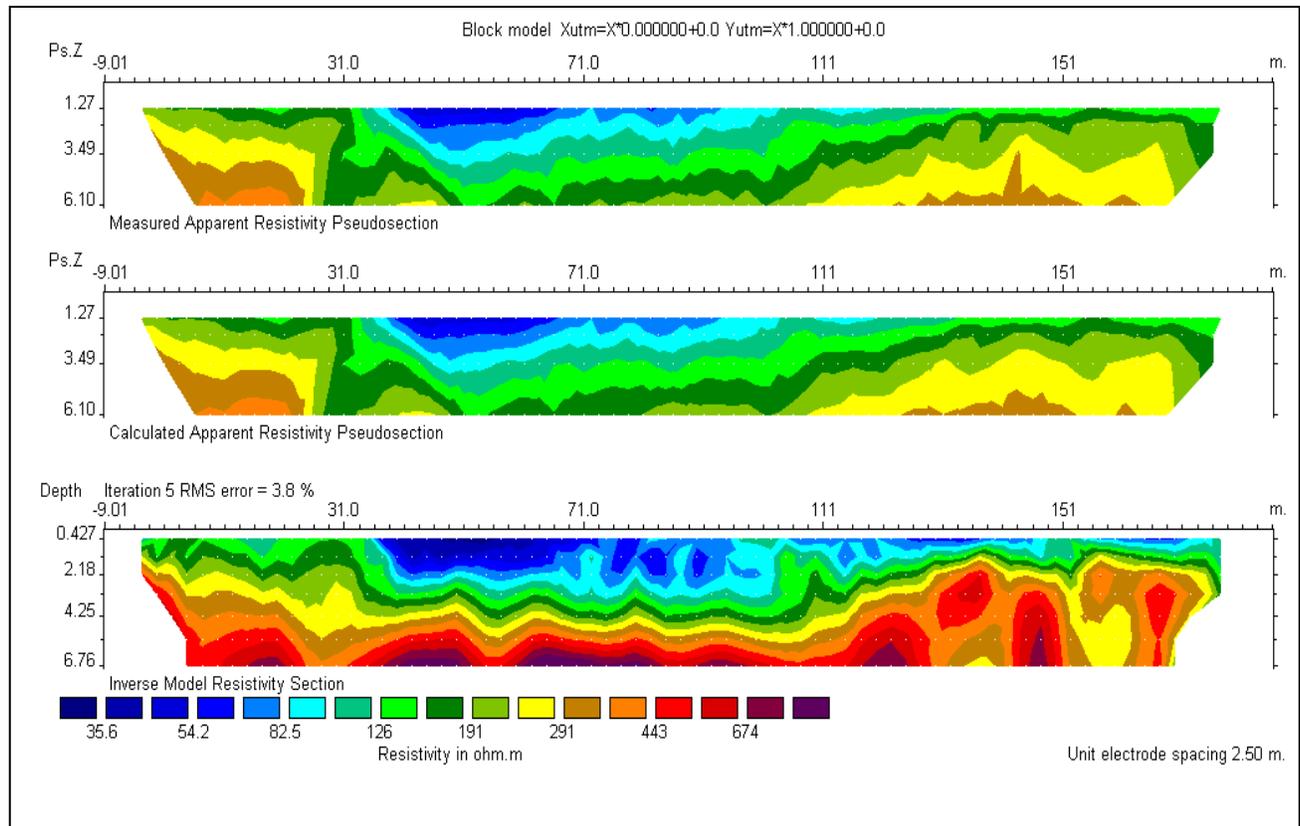


Figura A.14: Ejemplo de una Pseudosección medida con el Ohmmapper y Modelo Bidimensional resultante de la inversión de los datos.

Como se dijo anteriormente, el valor de resistividad aparente en un punto es un promedio de la resistividad en un entorno a este punto, por lo que una pseudosección difiere mucho de la distribución real de resistividad en el medio. A continuación, en las figuras A.15, A.16, A.17 y A.18, se muestran algunos ejemplos de modelos teóricos con sus respectivas pseudosecciones para dar cuenta de esta característica.

En estos ejemplos también se puede notar que los valores de resistividad aparente dependen del arreglo de electrodos utilizado.

A.7.2.1 Modelo 1: Bloque Centrado en un Semiespacio.

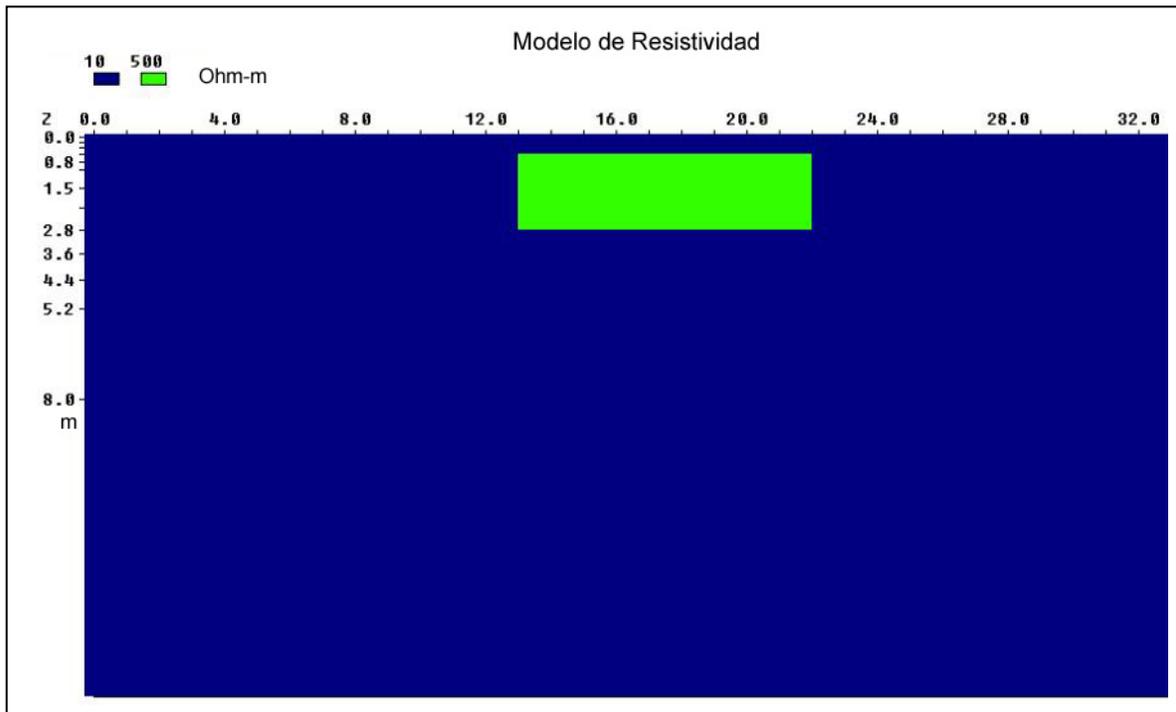


Figura A.15: Modelo de Bloque de 500 Ωm , centrado en un Semiespacio de 10 Ωm .

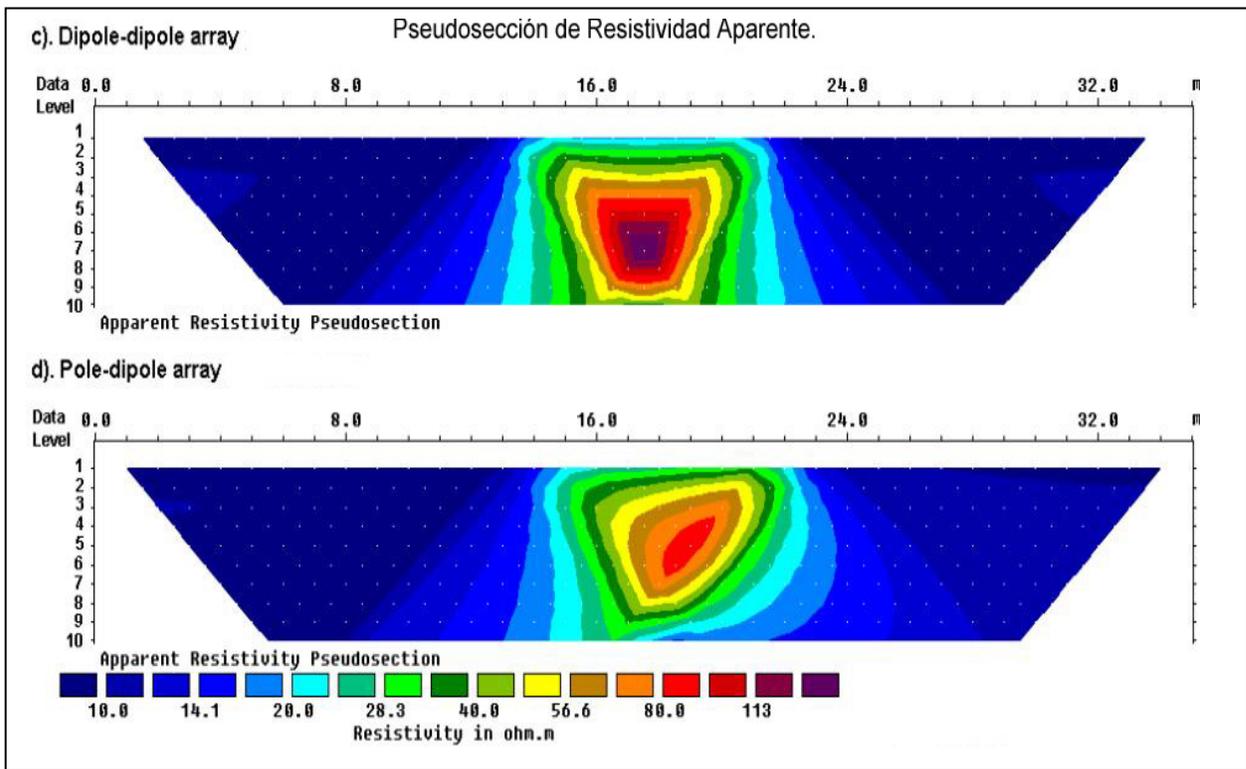


Figura A.16a: Pseudosección de Resistividad Aparente para Modelo 1 en un arreglo Dipolo-Dipolo y un arreglo Polo-dipolo.

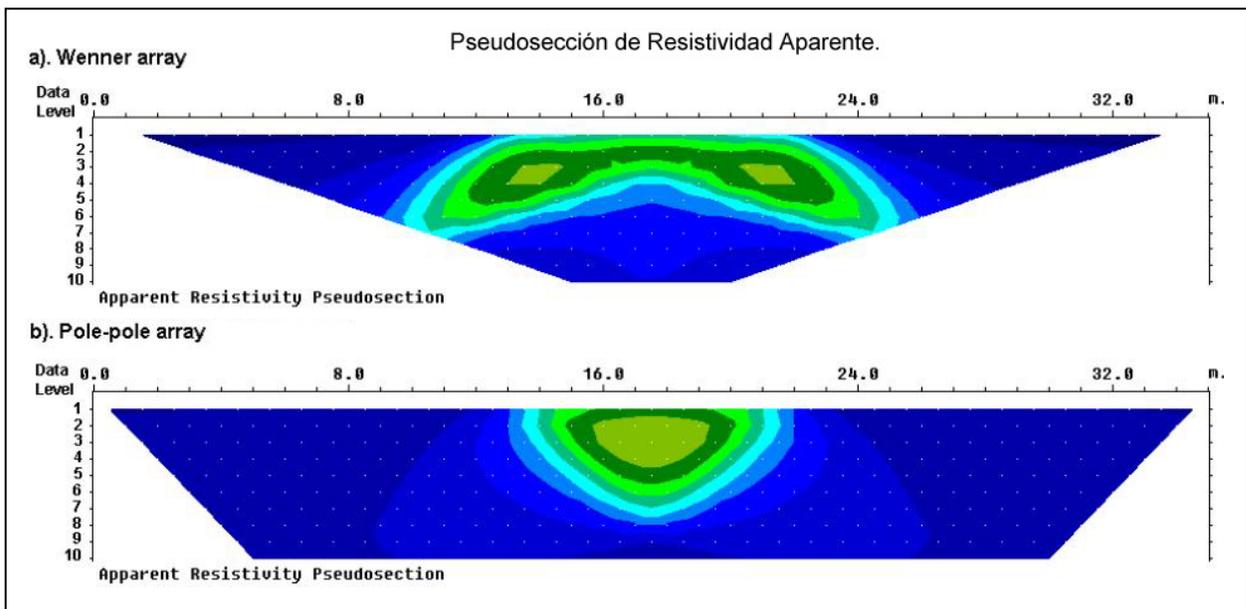


Figura A.16b: Pseudosección de Resistividad Aparente para Modelo 1 en un arreglo Wenner y un arreglo Polo-Polo.

A.7.2.2 Modelo 2: Inhomogeneidad Lateral en dos capas.

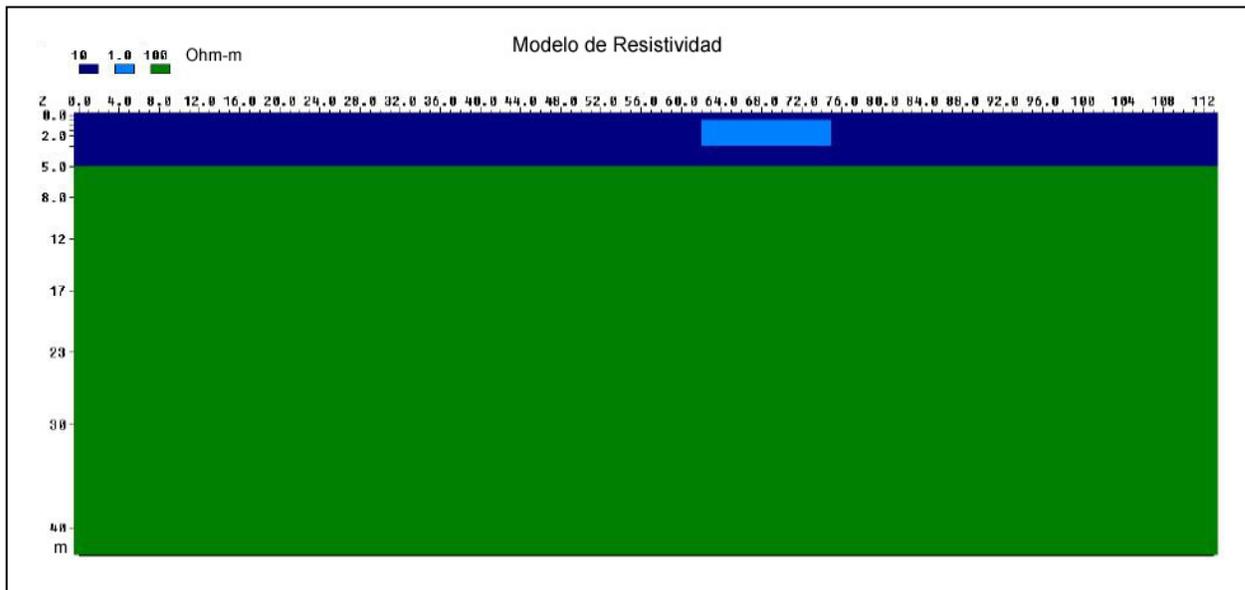


Figura A.17: Modelo 2 de inhomogeneidad lateral de 1 Ωm , en dos capas con resistividades de 10 Ωm y 100 Ωm .

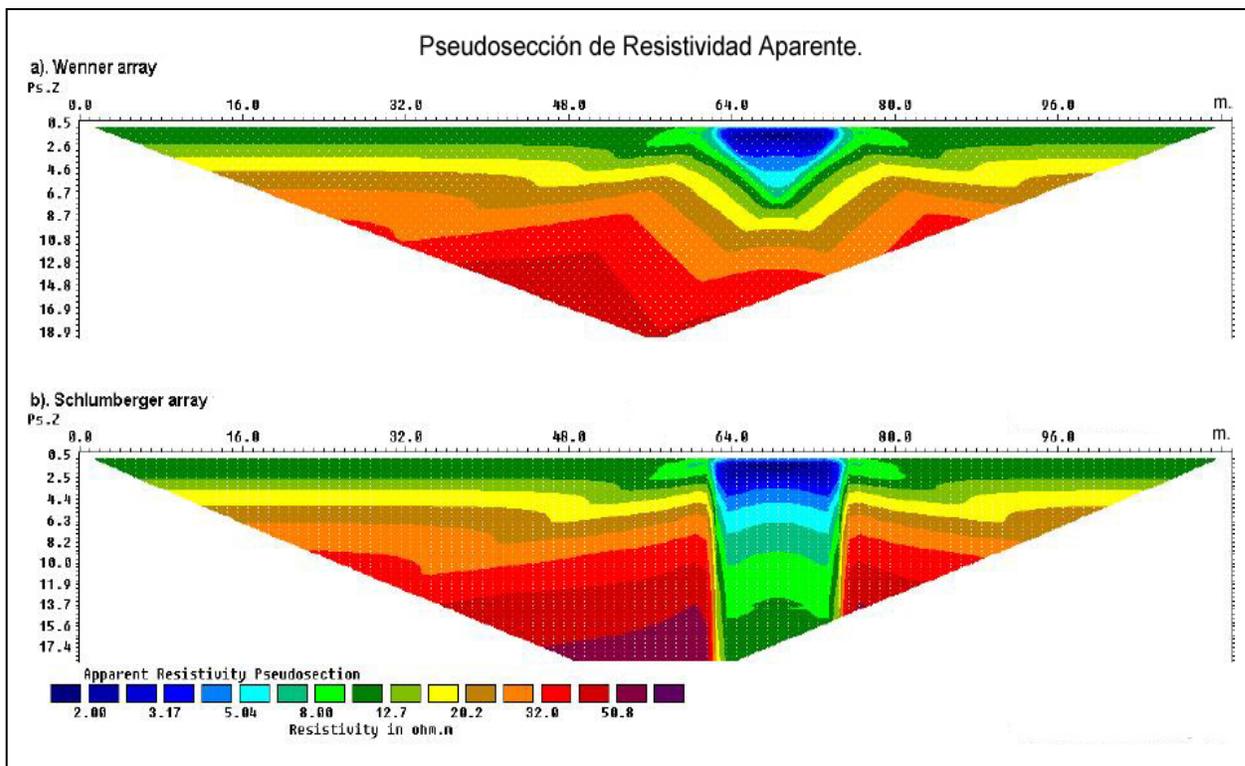


Figura A.18: Pseudosección de Resistividad Aparente para Modelo 2 en un arreglo Wenner y un arreglo Schlumberger.

Modulo 1: Sondajes Eléctricos Verticales (SEV): Método Galvánico Tradicional.

1.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS.

1.2 EXPERIENCIA PRÁCTICA.

1.2.1 Objetivos.

- Aplicar conceptos físicos relacionados a la electricidad (Voltaje, Corriente y Resistencia), en el estudio de medios geológicos.
- Aplicar el Método Galvánico Tradicional para medir la resistividad de un medio geológico.
- Confeccionar, analizar e interpretar Sondajes Eléctricos Verticales.

1.2.2 Equipamiento.

Para la experiencia se utilizará el siguiente equipamiento presentado en la Figura 1.1:

- Equipo SEV: instrumento que consiste principalmente en una fuente de poder que utiliza dos baterías internas de 12 [volts] cada una. Además posee un transformador cuya función es convertir a 300 [volts] el voltaje en corriente continua. El equipo también posee un Amperímetro y Voltímetro interno que se utilizan para medir la corriente que se inyecta al medio y el voltaje entre los electrodos de potencial. Tiene las conexiones para los cables que van unidos a los electrodos de corriente y potencial y una conexión para una batería externa. Internamente son dos circuitos independientes, uno para medir la corriente y el otro para medir el voltaje. Externamente es un maletín plateado con un peso aproximado de unos 7 kg.
- Amperímetro: es recomendable usar un amperímetro externo al equipo SEV, para comparar las mediciones de corriente. Se conecta en serie con el equipo SEV y los electrodos de corriente.
- Voltímetro: también es recomendable usar un Voltímetro externo al equipo SEV para comparar las mediciones. Se conecta en paralelo a los electrodos de potencial.

- Barras Conductoras: cumplen la función de los electrodos de corriente y potencial. Se conectan por medio de los cables al equipo SEV. Es necesario que la unión con los cables no sea fija para un procedimiento más rápido y fácil, que las barras posean una punta y sean resistentes para que queden bien enterradas y así poder inyectar de mejor manera corriente al medio.
- Cables: de 2 mm de diámetro con un centro conductor de cobre. Su función es transportar la corriente desde el equipo SEV a los electrodos de corriente y por otro lado sirven para unir los electrodos de potencial a un voltímetro ya sea, el del equipo o uno externo. Pueden tener distinta longitud, dependiendo del arreglo de electrodos, aunque por lo general, se dividen en los cables de poca longitud (no más de 1 m) que se utilizan para hacer conexiones locales entre los instrumentos utilizados, y los cables de gran longitud (decenas de metros) que se utilizan para unir los electrodos más lejanos (dependiendo del arreglo de electrodos puede ser C1, C2, P1 o P2) al equipo SEV. En este caso los cables de potencial tienen una longitud de 8 m, y los cables de corriente, 100 m.
- Huincha: para marcar las distintas posiciones de los electrodos.

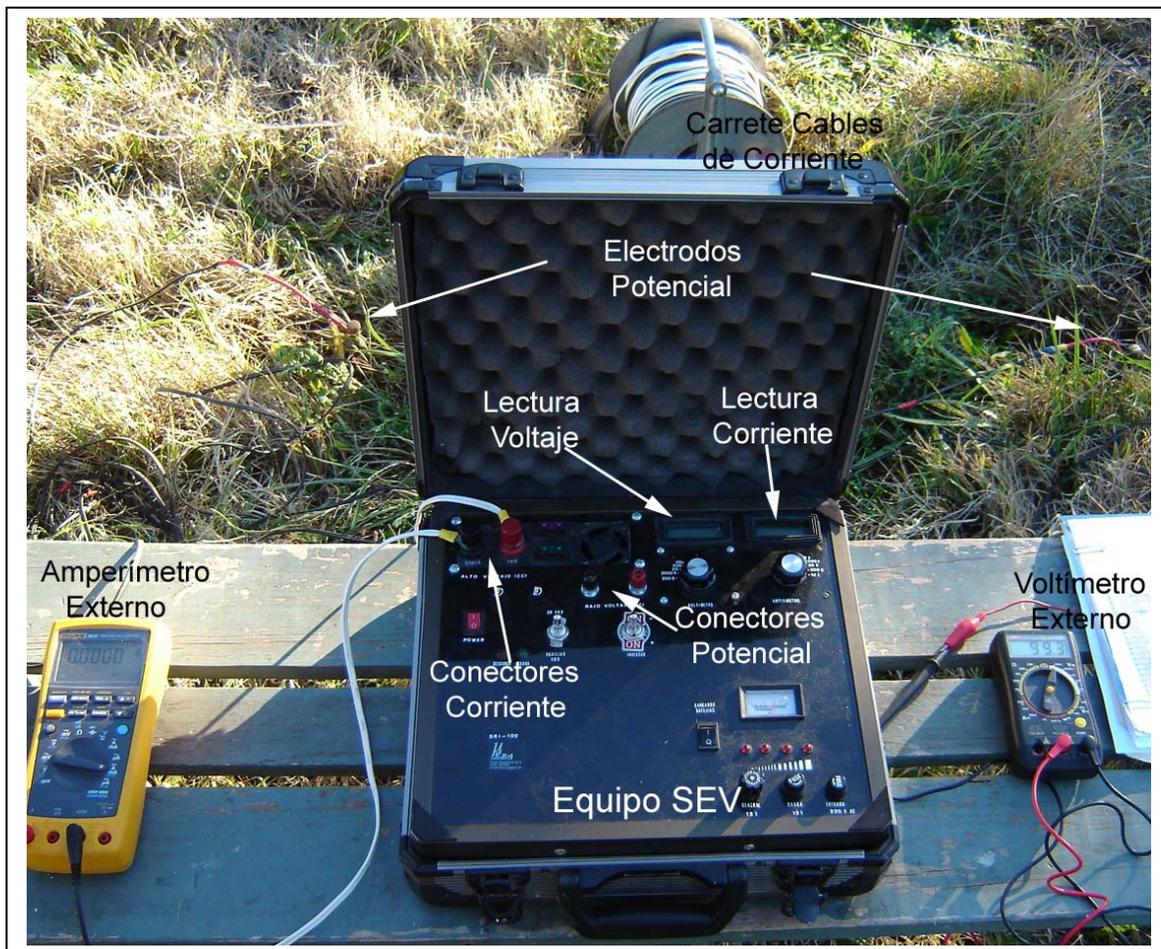


Figura 1.1: Equipamiento utilizado para la generación de un SEV.

1.2.3 Metodología.

1.2.3.1 Descripción del Terreno.

Las mediciones se efectuarán en un terreno que se caracteriza por una superficie de gravilla o pasto bajo la se encuentran sedimentos medianamente compactos que, probablemente han sido removidos por la acción antrópica, por lo menos en la parte más superficial. El nivel freático se debiera encontrar en no más de 50 metros de profundidad.

1.2.3.1 Geometría de Adquisición de Datos.

El arreglo a utilizar en la experiencia será el arreglo Wenner-Schlumberger o simplemente Schlumberger, es decir, que los electrodos de potencial estarán al centro separados una distancia a y los electrodos de potencial estarán en los extremos a una distancia na de los electrodos de potencial. Otra forma de caracterizar la geometría para este arreglo es denominar AB a la distancia entre los electrodos de corriente y MN a la distancia entre los electrodos de potencial, en la figura 1.2 se puede apreciar ambas nomenclaturas.

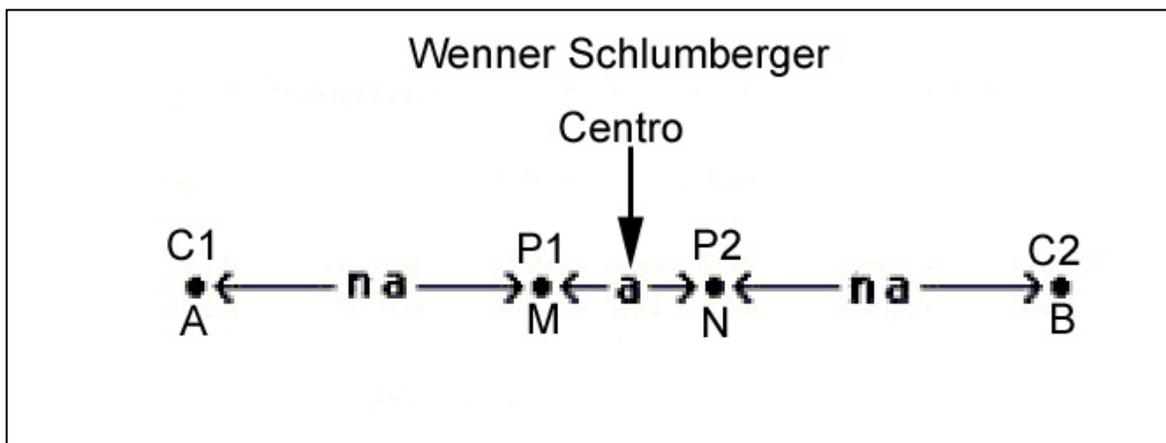


Figura 1.2: Arreglo Schlumberger.

El factor geométrico para este arreglo tiene dos formas dependiendo de los parámetros utilizados:

$$K = \pi \frac{[(AB/2)^2 - (MN/2)^2]}{MN} \qquad K = \pi \cdot n \cdot (n+1) \cdot a$$

La distancia $AB/2$ equivale aproximadamente a la profundidad de investigación.

1.3 GUÍA DE TRABAJO

1.3.2 Guía para el Alumno.

1.3.2.1 Procedimiento de Adquisición de Datos.

1. Escoger el punto de central donde se realizará el SEV.
2. Conectar los el amperímetro en serie y el voltaje en paralelo a los cables de corriente (cables del carrete) y de potencial (cables cortos), respectivamente.
3. Con la huincha, medir una distancia $MN/2$ inicial a ambos lados del centro y enterrar los electrodos (barras de cobre) a esa distancia.
4. Con la huincha, medir una distancia $AB/2$ inicial a ambos lados del centro y enterrar los electrodos (barras de cobre) a esa distancia.
5. Tratar de que los electrodos y el centro queden alineados.
6. Conectar los cables de corriente a los electrodos de los extremos y los cables de potencial a los electrodos centrales.
7. Cerrar el circuito de corriente en serie, uniendo un cable de corriente al amperímetro externo y éste a su vez conectarlo a una conexión de corriente del equipo SEV, mientras que el otro cable de corriente se conecta directamente al equipo SEV.
8. Conectar los cables de potencial al voltímetro externo o a las conexiones de potencial del SEV. También es posible conectar los cables a ambos voltímetros con el cuidado de que queden en paralelo.
9. Prender el equipo SEV, el amperímetro y voltímetro.
10. Dejar el amperímetro para que mida en A y el voltímetro en mV.
11. El equipo esta listo para comenzar la medición.
12. Aplicar corriente en sentido positivo (Ciclo Directo) moviendo el switch de polaridad hacia arriba, aunque esto dependerá de la polaridad de conexión entre el equipo y los instrumentos de medición.
13. Tomar nota de los valores de Corriente y Voltaje dados por los instrumentos. Tratar de que los valores sean tomados al mismo tiempo. Para logra esto, los multímetros cuentan con un botón que sirve para congelar la medida.
14. Mover el switch de polaridad hacia el centro para dejar de inyectar corriente.
15. Mover el switch de polaridad en sentido contrario (hacia abajo) (Ciclo Reverso) y anotar nuevamente los valores de Corriente y Voltaje.
16. Mover nuevamente el switch hacia el centro y apagar el equipo SEV.
17. Desconectar los electrodos de corriente para poder moverlos.
18. Desplazar los electrodos de corriente unos metros más hacia los extremos, es decir, variar la distancia $AB/2$ y mantener constante la separación entre los electrodos de potencial.
19. Conectar nuevamente los electrodos de corriente y realizar una nueva medición, repitiendo los pasos desde el 10 al 18.

20. Realizar nuevas medidas con distintos valores de $AB/2$ hasta que la diferencia de potencial entre el ciclo directo y el reverso sea pequeña (< 10 V), aunque depende de la experiencia.
21. Para que la diferencia entre los valores de potencial del ciclo directo y reverso aumenten es necesario aumentar la distancia MN, dejando fija la última distancia AB para poder comparar la medición ya que se estaría midiendo el mismo punto en profundidad.
22. Se aumenta una vez MN y luego comienza a aumentarse de nuevo AB hasta que las lecturas de Voltaje disminuyan nuevamente, y así volver a aumentar MN.
23. Cuando ya se han tomado las medidas necesarias, o ya no se puede penetrar más en el terreno debido a la falta de cables más largos o a las características del terreno, apagar y guardar el equipo.

1.3.2.2 Análisis e Interpretación de Datos.

Para el cálculo de la resistividad aparente, es conveniente ingresar los datos a una planilla Excel y calcular el voltaje y corriente de los ciclos combinados.

$$V_C = \frac{|V_D - V_R|}{2}$$

donde V_C = Voltaje del Ciclo Combinado
 V_D = Voltaje del Ciclo Directo
 V_R = Voltaje del Ciclo Reverso

La misma fórmula se utiliza para calcular la corriente del ciclo combinado.

Es necesario el cálculo de los ciclos combinados debido a que el medio posee un potencial natural (Como el experimento de la batería de papa), por lo que los datos se deben corregir por este factor.

Una vez calculados el Voltaje y la Corriente de los ciclos combinados, se procede a calcular el factor geométrico y finalmente la resistividad aparente.

Los datos de resistividad aparente y profundidad de investigación deben ser graficados en un grafico log-log.

Para encontrar un modelo de resistividad del medio, se debe usar un programa hecho en Matlab (sev_s_mo) que será explicado en clases.

1.4 RECOMENDACIONES.

1.4.1 Medidas de Seguridad.

- No tocar los electrodos de corriente cuando el equipo esté funcionando. Para mover los electrodos hay que asegurarse de que el equipo esté apagado. Es recomendable hacer la experiencia con calma.

1.4.2 Cuidado y Limpieza del Equipo.

- El día antes de la experiencia, hay que asegurarse que las baterías del equipo SEV están cargadas.
- Es importante que el multímetro que se usará como amperímetro este conectado en serie, en las conexiones que corresponden y seleccionado para medir en Amperes antes de encenderlo para no quemar el instrumento.
- El multímetro que se utilizará como voltímetro debe estar conectado en paralelo, en las conexiones adecuadas y seleccionado para medir en volts, antes de prenderlo, sino es posible quemar el instrumento.

1.4.3 Confección de Informe

El informe que se debe elaborar debe contener los siguientes puntos como mínimo:

1. Portada.
2. Introducción.
3. Objetivos.
4. Materiales y equipos.
5. Metodología.
6. Análisis e Interpretación de datos.
7. Conclusiones

1.4.4 Desarrollo de módulo.

Antes de comenzar la experiencia, es recomendable realizar una pequeña evaluación a los alumnos sobre los antecedentes teóricos relacionados con el tema para así, desarrollar de una mejor manera el módulo.

El tiempo recomendable para un buen desarrollo del módulo es de 3 horas, aunque es posible realizarlo en 2 horas.

Modulo 2: Generación de Perfiles Eléctricos de Resistividad mediante el uso de Ohmmapper.

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS.

2.2 EXPERIENCIA PRÁCTICA.

2.2.1 Objetivos.

- Aplicar conceptos físicos relacionados a la electricidad (Voltaje, Corriente y Resistencia), en el estudio de medios geológicos.
- Conocer y aprender a utilizar el Ohmmapper como instrumento para medir la resistividad de un medio geológico
- Confeccionar, analizar e interpretar perfiles eléctricos de resistividad aparente.

2.2.2 Equipamiento.

2.2.2.1 Descripción del equipo.

A continuación se señalarán los distintos componentes del Ohmmapper, mostrados en la Figura 2.1.

Transmisor: Produce una Corriente Alterna (CA) de 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 o 16 mA., dependiendo del largo de los electrodos y las condiciones del suelo. La Corriente Alterna es una señal sinusoidal de frecuencia de 16.5 KHz. La potencia máxima es de 2 Watts. Incluye chasis (color negro con distintivo verde para diferenciarlo del receptor), dos baterías y una cubierta de plástico duro (color blanca), con un peso total de 3.2 Kg.

Receptor: Posee una Impedancia de más de 10 MOhms en la frecuencia de operación (16.5 KHz), para evitar que escape un flujo de corriente desde el interior. Mide la diferencia de potencial entre los electrodos. También conoce al instante la medida de corriente del transmisor mediante una señal modulada a 2 Hz y 4Hz. Incluye chasis (color negro con distintivo naranja), dos baterías y una cubierta de plástico duro (color blanca), con un peso total de 3.2 Kg.

Cables Electrodo: Externamente se asemejan a cables de aproximadamente 1 cm. de diámetro (color negro). Internamente corresponden a un par de cables enrollados y un relleno no conductor envueltos por una trenza de cobre que conforman el escudo coaxial. Todo está cubierto por un aislante de plástico duro. El largo de los cables electrodo es 1, 2.5 y 5 m. El peso de los cables electrodo es de 85 g/m. En los extremos poseen conectores que sirven para unir los electrodo con el transmisor, receptor y terminales que sirven para cerrar el circuito.

Barra de Fibra Óptica: Barra de 1 m. de largo, color café claro que convierte la señal eléctrica del receptor a una señal óptica y luego la convierte a otra señal eléctrica para ser leída por la consola.

Consola: Es un mini procesador donde se almacenan los datos de las mediciones. Está conformada por una pantalla y un teclado. Además en ella se ingresan los parámetros del arreglo geométrico de electrodo que se esté implementando. Es alimentada por baterías de 24 volts y tiene un peso aproximado de 1.6 kg.

Conectores de la consola: Es un cable conformado por cinco conectores: un puerto serial que se encarga de transferir las mediciones a la consola, el cable de poder que une las baterías con la consola, un conector para un elemento externo como un GPS por ejemplo y el conector que une la consola con el cable de arrastre. Ver Figura 2.2.

Cable de Arrastre: Tiene las mismas características que un cable electrodo y su función es unir la barra de fibra óptica con los conectores de la consola para el traspaso de datos desde el receptor hacia ésta.

Peso: Es un cilindro metálico que se ajusta a la barra de fibra óptica. Su función es mantener el cable dipolo receptor en contacto con la superficie del medio para que haya un traspaso efectivo de corriente al receptor.

Cuerda: Permite arrastrar el transmisor y receptor al mismo tiempo, manteniendo constante la separación (n_a) entre ellos. Hecha de un material no conductor.

Cinturón y Harnnes: La consola va unida a estos elementos que sirven para transportarla durante la medición, además en el cinturón se guardan las baterías que alimentan la consola y sirven para distribuir todo el peso del equipo al ser arrastrado.



Figura 2.1: Componentes del Ohmmapper.



Figura 2.2: Conectores de la Consola.

2.2.2.2 Ensamble del equipo.

A continuación se presenta un ensamble esquemático del equipo (ver Figura 2.3), para una descripción detallada siga las instrucciones del Ayudante.

- 1.- Inserte las baterías al transmisor y receptor.
- 2.- Una los cables electrodos al receptor y transmisor.
- 3.- Conecte las terminales a ambos extremos de los cables electrodos del transmisor y al extremo posterior del electrodo transmisor.
- 4.- Conecte la barra óptica al extremo anterior del electrodo receptor.
- 5.- Conecte la barra óptica al cable de arrastre.
- 6.- Una los electrodos transmisor y receptor por medio de una cuerda.
- 7.- Conecte la consola con el cable de arrastre.
- 8.- Cuando este todo conectado, prenda el transmisor y el receptor.
- 9.- Encienda la consola y seleccione la opción Ohmmapper.
- 10.- Finalmente el equipo está listo para la configuración inicial y para recibir los parámetros del experimento.

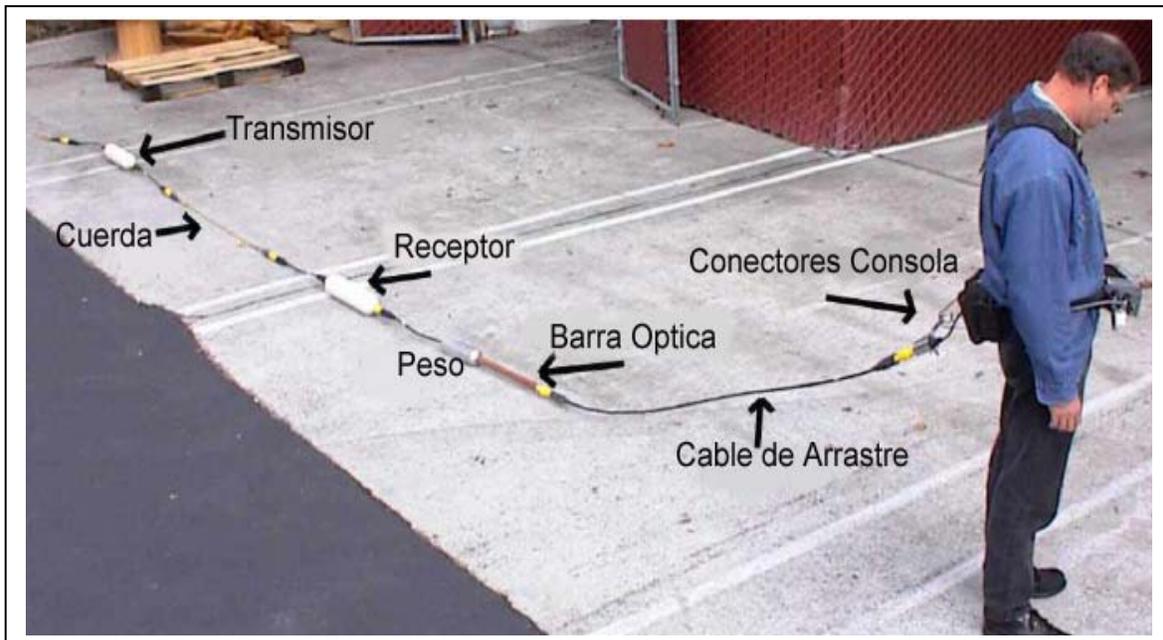


Figura 2.3: Montaje del Equipo.

2.2.3 Metodología.

2.2.3.1 Descripción del Terreno.

Las mediciones se efectuarán en un terreno que se caracteriza por una superficie de gravilla y en un pequeño sector está cubierta por asfalto (ver Fig. 2.4). Bajo esta superficie se encuentran sedimentos medianamente compactos que, probablemente han sido removidos por la acción antrópica, por lo menos en la parte más superficial. Por tratarse de un medio con resistividades medias, el “Skin Depth” puede ser una limitante en la Profundidad de Investigación.

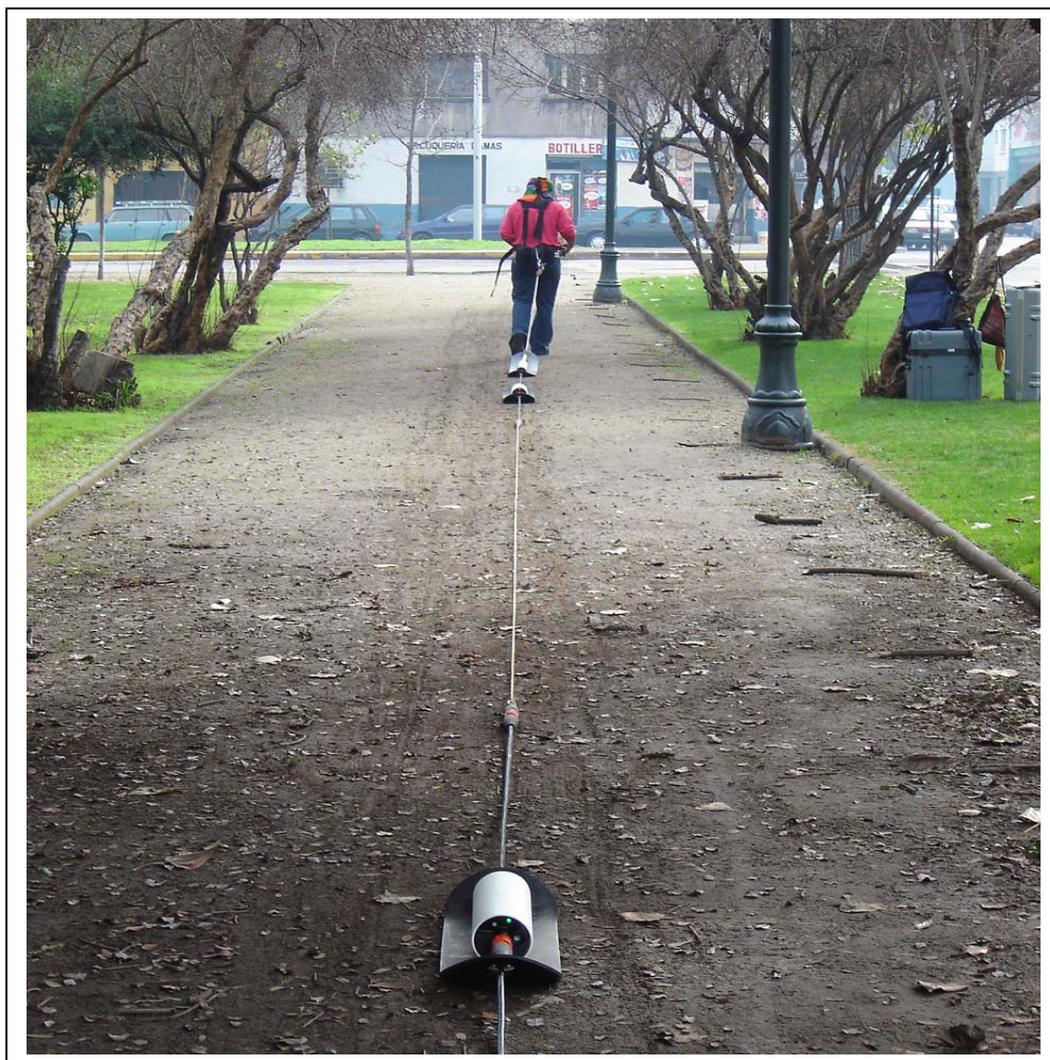


Figura 2.4: Mediciones en Plaza Ercilla.

2.2.3.2 Geometría de Adquisición de Datos.

Hay que tener claro que el arreglo de electrodos utilizado es un dipolo-dipolo por lo que es necesario definir el espaciamiento entre electrodos (parámetro a) y la distancia entre los dipolos (na). También hay que definir la línea de medición y la distancia entre cada punto de medición.

Para la experiencia se utilizarán cables dipolos de largo 2.5 m, por lo que el largo del dipolo receptor será de 5m., al igual que el largo del dipolo transmisor. La separación entre los dipolos será en un comienzo de 1 m, luego de 2.5 m, 5 m, 10m y finalmente de 15 m., por lo que el factor n será 0.2, 0.5, 1, 2 y 3

La medición se hará en una línea recta de aproximadamente 100 m. con una distancia entre puntos de medición, de 2 m. La distancia entre el operador y el comienzo del dipolo receptor será de 3 m. En la Figura 2.5 se muestra un ejemplo de los parámetros geométricos que se ingresan a la Consola, donde F es la distancia entre el operador y el dipolo Receptor, P es el largo del dipolo Receptor, S es el largo de la cuerda y C el largo del dipolo Transmisor.

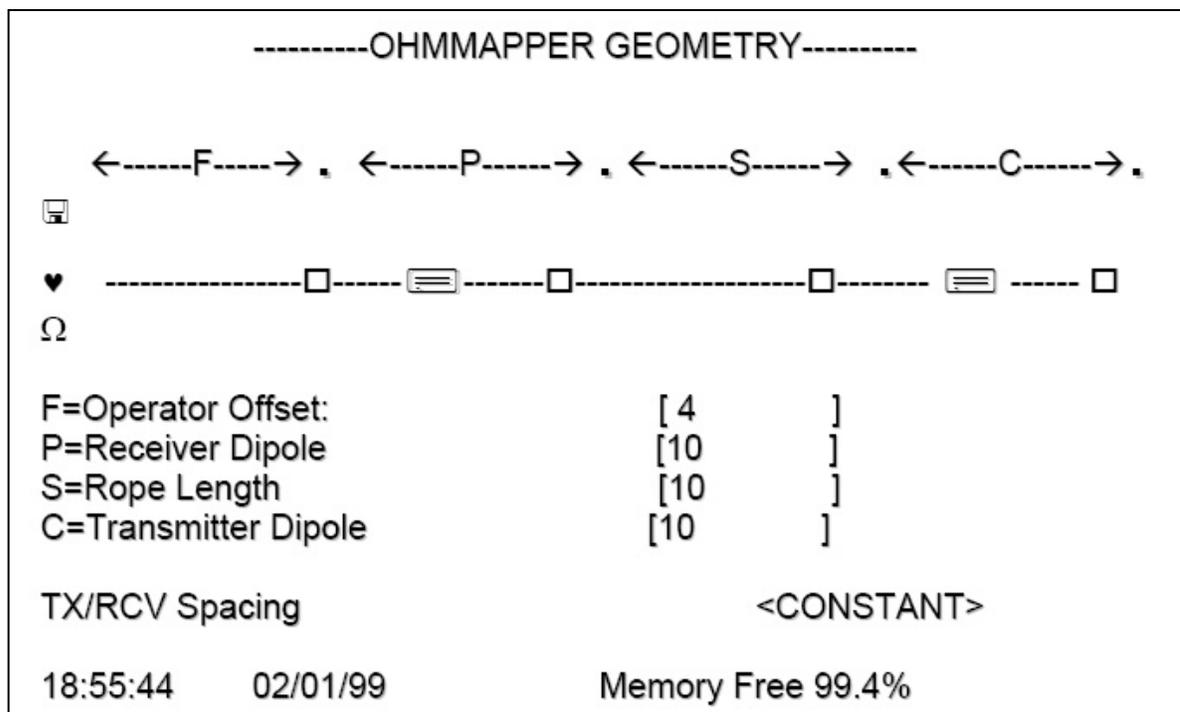


Figura 2.5: Ejemplo de la Geometría de Adquisición de Datos ingresada a la Consola.

2.3 GUÍA DE TRABAJO.

2.3.1.6 Comparación entre el Ohmmapper y el Método Galvánico Tradicional.

2.3.1.6.1 Resultados de la Experiencia (Plaza Ercilla).

La comparación para esta experiencia se puede realizar en los primeros metros del subsuelo, debido a la profundidad de investigación proporcionada por el Ohmmapper que es de un poco más de 4 m.

Los valores de resistividad aparente proporcionada por ambos métodos son muy coincidentes: el SEV proporciona valores entre un rango de 60-100 Ωm para los primeros metros de profundidad, mientras que el Ohmmapper da un rango de 50-150 Ωm en torno al punto donde se hizo el SEV (a 80 m del origen de la línea de medición del Ohmmapper).

Los modelos de resistividad no son muy comparables debido a que representan distintas distribuciones espaciales y además se obtienen con dos métodos distintos (Inversión de datos del Ohmmapper y método de prueba y error para los datos del SEV). Solo se podría comparar la resistividad superficial que ambos modelos la estiman cercana a 60 Ωm .

Como conclusión para esta experiencia, los métodos son complementarios en cuanto a la información espacial que entregan, es decir, el Ohmmapper entrega información detallada de superficie y el SEV entrega una información general en profundidad, y la comparación entre ambos métodos es útil, en cuanto se utilice como una calibración para los valores de resistividad entregados por ellos, por lo menos en los primeros metros de estudio.

A continuación se presentan los resultados de dos experiencias realizadas con el Ohmmapper en distintos lugares aunque con similar característica y su comparación con el método galvánico.

2.3.1.6.2 Resultados Parque O'Higgins.

Descripción del terreno: Principalmente son rellenos sedimentarios moderadamente compactos de mediana a baja resistividad por lo que el "Skin Depth" es una limitante en la profundidad de penetración. Por tratarse de un terreno urbano la posibilidad de intervención humana en los primeros metros del subsuelo es alta lo que hace más heterogéneo el medio.

Fecha de medición: Esta medición se realizó el 7 de Abril de 2005, antes de la época de lluvias.

Geometría de Adquisición: Se realizó una línea este-oeste, con marcas cada 2.5 m. y a una tasa de 2 medidas por segundo. El largo de la línea es aproximadamente 60 m. y se utilizaron 3 largos de cuerdas $n = 0.5, 1$ y 2 con un largo de electrodos constante de 5 m.

Resultados Ohmmapper:

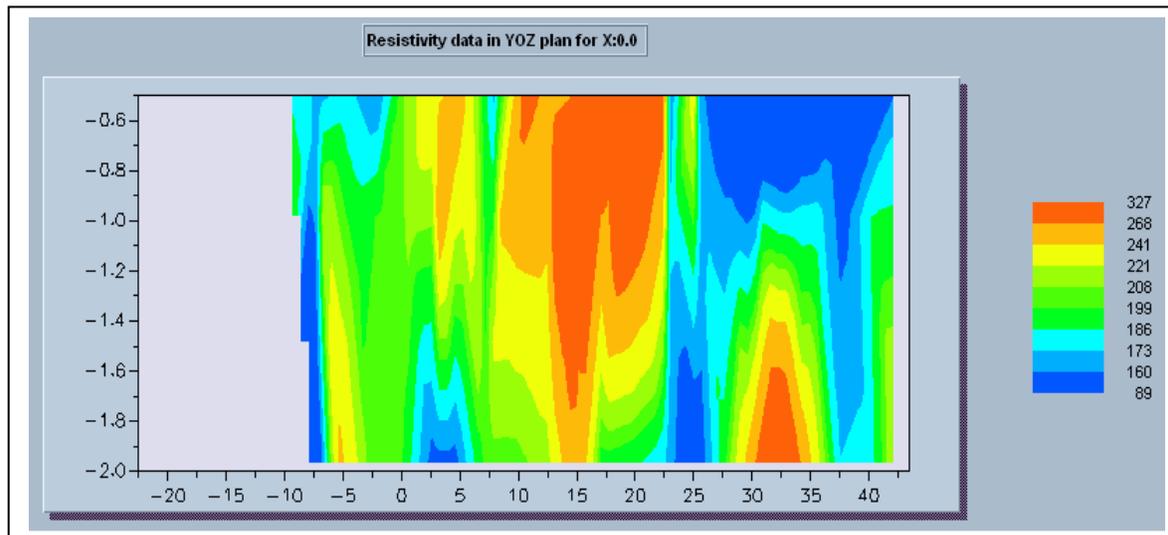


Figura 2.7: Pseudosección de Resistividad Aparente, Parque O'Higgins.

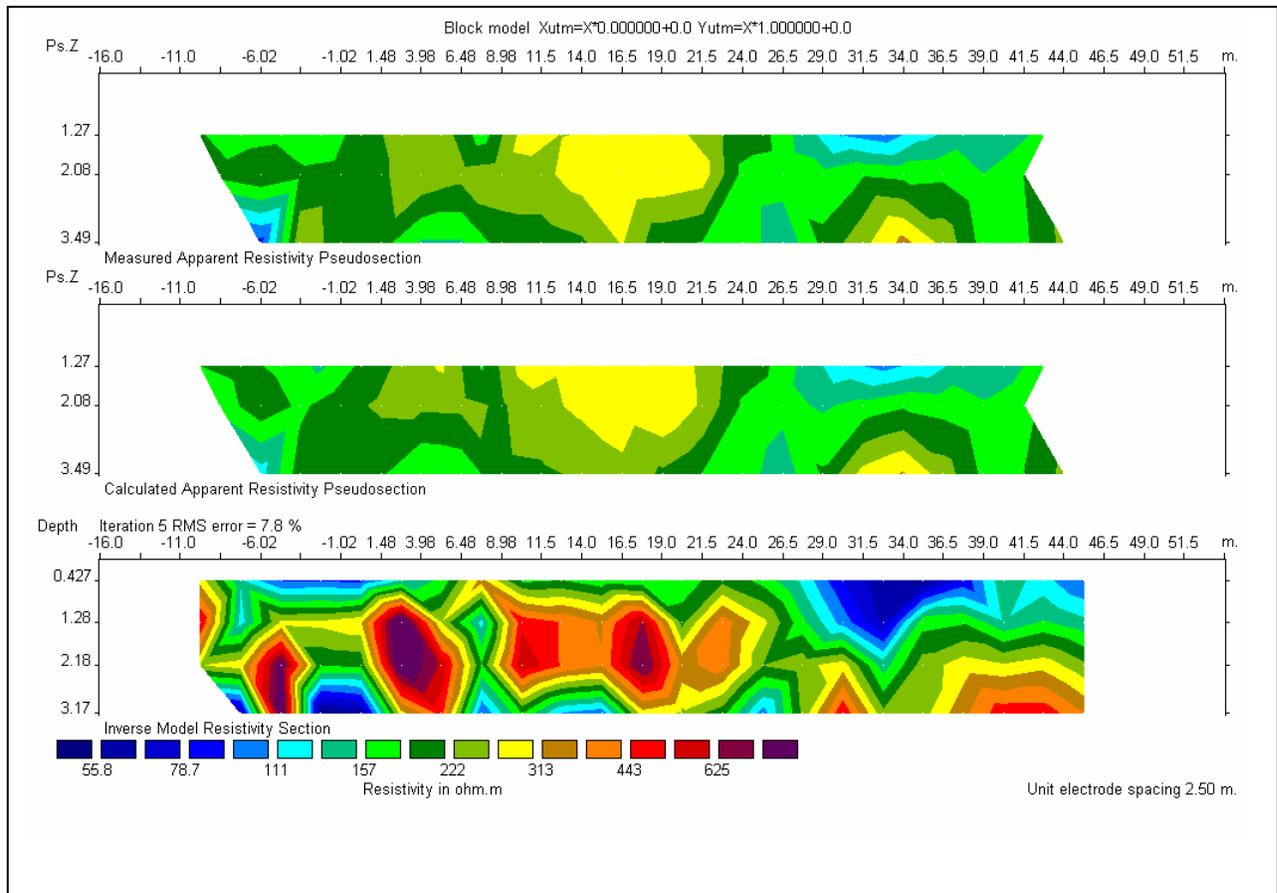


Figura 2.8: Modelo 2D de Resistividad, Parque O'Higgins.

Interpretación de resultados: La profundidad de investigación alcanzó los 3 m, debido a largo y separación de electrodos utilizado por lo que se puede interpretar:

1. Los valores de resistividad están entre los rangos esperados para sedimentos (55-700 Ω m).
2. Hay una distribución heterogénea de resistividad probablemente debido al retrabajo o intervención del terreno, o también producto del detalle de la pseudosección.
3. La zona de baja resistividad (55 Ω m) es explicada por la saturación parcial del terreno debido a la presencia de un canal a 40 m del origen.

Resultados SEV: Los resultados e interpretación se encuentran en el Módulo 1.

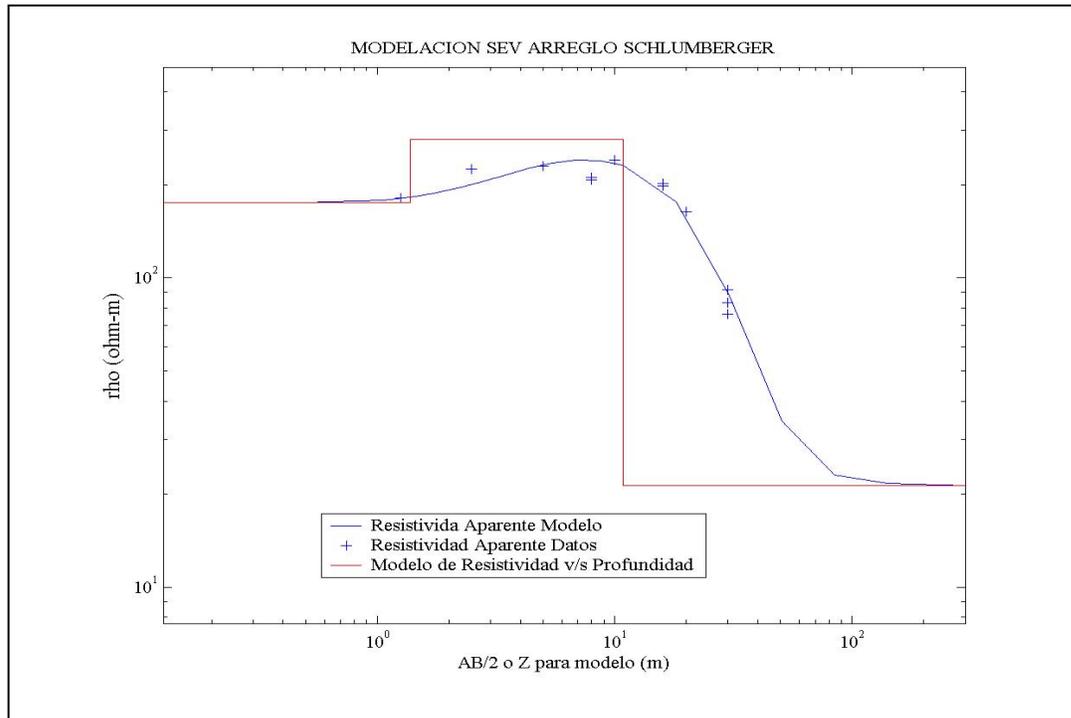


Figura 2.14: Modelo Unidimensional SEV Parque O'Higgins.

La comparación para este caso solo se puede realizar en base a los valores de resistividad encontrados con ambas metodologías de medición. Para el SEV las resistividades encontradas fueron 180, 290 y 20 Ω m, mientras que el Ohmmapper encontró resistividades entre 50 y 700 Ω m.

Los valores de resistividad aparente son aún más cercanos.

Para la distribución de resistividad no se puede realizar una comparación debido a que el Ohmmapper entrega información en detalle pero solo de los primeros 3 m, mientras que el SEV entrega información de 30 m. en profundidad pero son valores promedios.

Como conclusión para esta experiencia, los métodos son complementarios en cuanto a la información espacial que entregan, es decir, el Ohmmapper entrega información detallada de superficie y el SEV entrega una información general en profundidad, y la comparación entre ambos métodos es útil, en cuanto se utilice como una calibración para los valores de resistividad entregados por ellos, por lo menos en los primeros metros de estudio.

2.3.1.6.3 Resultados Linderos.

Descripción del terreno: Principalmente son rellenos sedimentarios moderadamente compactos de mediana a baja resistividad por lo que el “Skin Depth” es una limitante en la profundidad de penetración. Es un terreno rural por lo que el subsuelo no debiese estar tan intervenido por el hombre por lo que es posible encontrar una estructura más homogénea y natural.

Fecha de medición: Esta medición se realizó el 4 de Junio de 2005, en plena época de lluvias. El suelo se notaba muy húmedo.

Geometría de Adquisición: Se realizó una línea norte-sur, con marcas cada 2.5 m. y a una tasa de 2 medidas por segundo. El largo de la línea es aproximadamente 180 m. y se utilizaron 5 largos de cuerdas $n = 0.5, 1, 2, 3$ y 4 con un largo de electrodos constante de 5 m.

Resultados Ohmmapper:

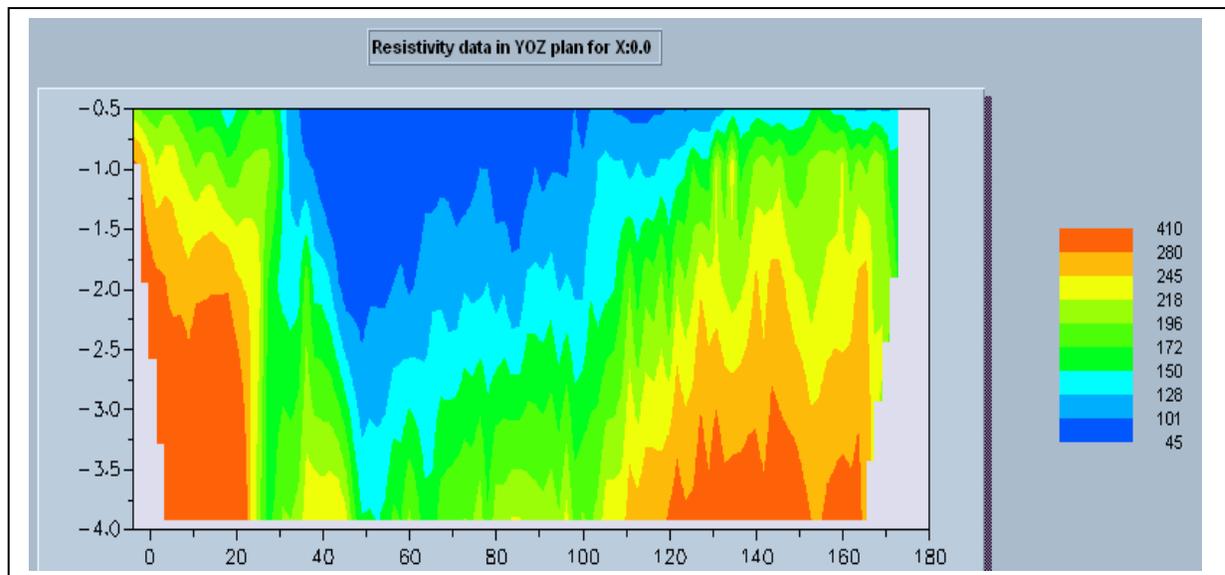


Figura 2.9: Pseudosección de Resistividad Aparente, Linderos.

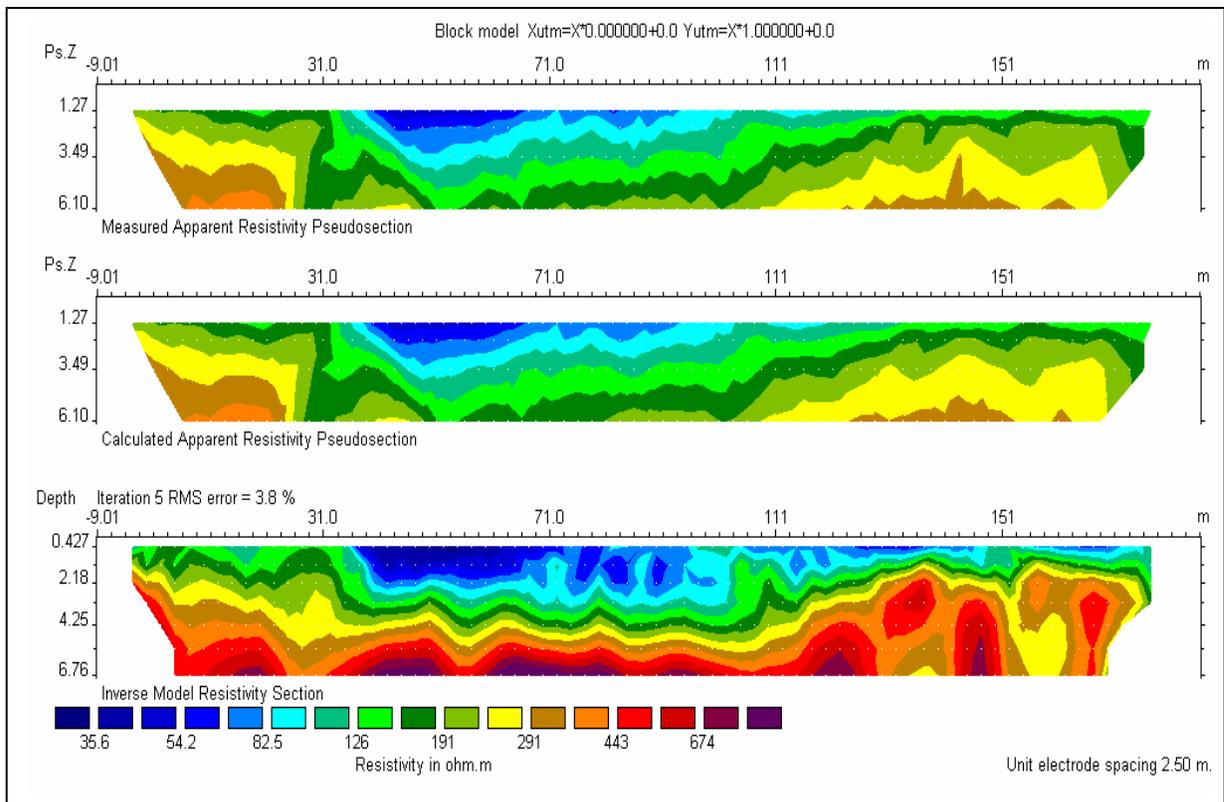


Figura 2.10: Modelo 2D de Resistividad, Linderos.

Interpretación de resultados: El modelo arrojado por la inversión da cuenta de una distribución de resistividad por capas, la cual aumenta en profundidad desde valores de 35 a 100 Ωm en la superficie hasta 600-700 Ωm a casi 7 m de profundidad. Esto se interpreta como la humedad superficial del terreno a causas de las lluvias y el regadío, mientras que las capas reflejan la homogeneidad del terreno. El regadío es un factor muy importante porque ayuda a entender la precisión con que trabaja el Ohmmapper, debido a que a 50 m del origen se ubica un canal perpendicular a la línea de medición que aporta una saturación extra al terreno reflejada en valores de resistividad de 35 Ωm . Incluso se puede apreciar que desde este punto hasta el final de la línea, la superficie se mantiene con bajas resistividades (alrededor de 35 Ωm), mientras que desde los 35 m hacia atrás, en la línea de medición, la superficie del terreno tiene resistividades del orden de 100 Ωm lo que concuerda con que el riego se efectúa en la zona de baja resistividad superficial a través de un par de canales ubicados en la misma zona.

Resultados SEV Linderos: Los resultados e interpretación se detallan en Modulo 1.

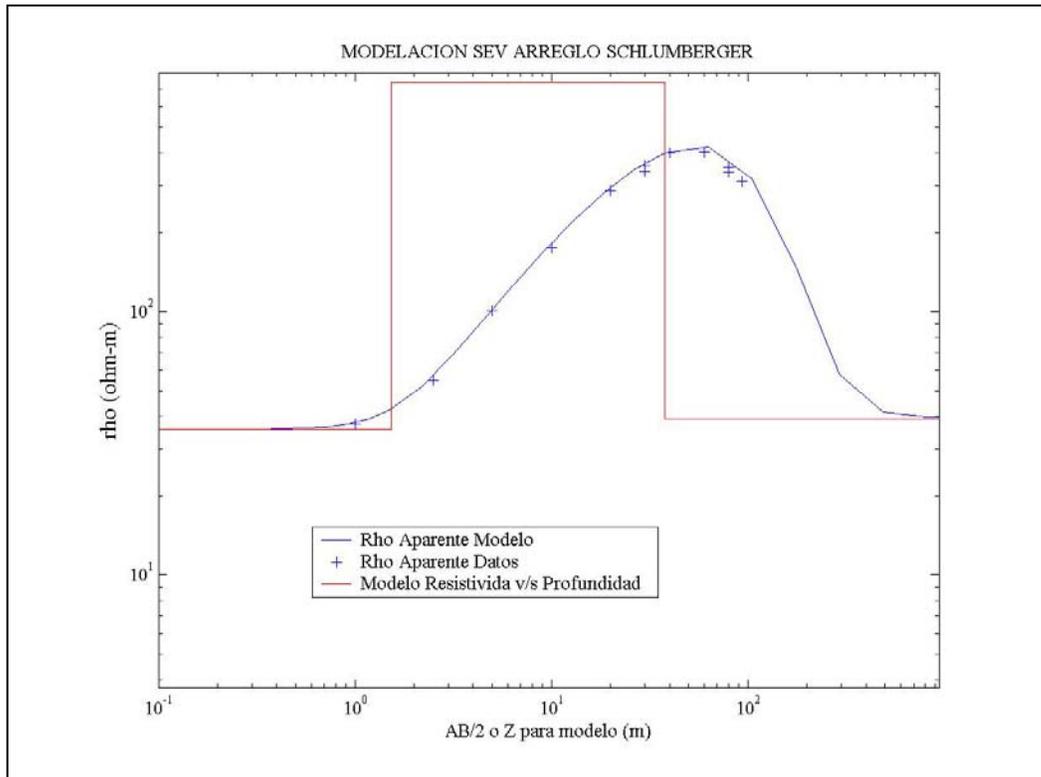


Figura 2.15: Modelo Unidimensional SEV Linderos.

Los rangos de resistividad resultante de los métodos de medición coinciden muy estrechamente. Por ejemplo, la resistividad superficial medida con ambos métodos es similar a 35 Ωm e incluso en profundidad los valores coinciden, obteniendo en el SEV una capa intermedia que va desde 1 a 30 m de profundidad de más de 700 Ωm de resistividad, mientras que el Ohmmapper da cuenta de este valor a una profundidad de 7 m. Hay que recordar que el SEV hace como una especie de promedio de resistividad.

En esta experiencia ambos métodos resultaron más comparables que la experiencia anterior debido a la homogeneidad del terreno y a la mayor área medida por el Ohmmapper. Además cada método nos da una información adicional, el Ohmmapper, la distribución de resistividad en superficie, y el SEV, una distribución general de la resistividad en profundidad.

2.3.1 Guía de Trabajo para el Alumno.

2.3.2.1 Procedimiento de Adquisición de Datos.

1. Antes de ensamblar el equipo, es necesario ubicar los puntos de medida sobre la línea de medición con el uso de una Huincha. Es importante que los puntos queden debidamente marcados para que durante la toma de datos no existan puntos sin medida.
2. Ensamblar el equipo como se explica en la sección anterior.
3. Unir los dipolo transmisor y receptor por el primer largo de cuerda especificado anteriormente ($S=1$).
4. Encender la Consola e ingresar los parámetros geométricos de la experiencia vistos anteriormente, en la opción del menú "Ohmmapper Geometry".
5. Encender el Transmisor y luego el Receptor y asegurarse que el receptor este recibiendo la señal del Transmisor. Para verificar esto la luz azul del Receptor debe estar parpadeando.
6. Seleccionar la opción "Search Mode" del menú del Ohmmapper a modo de verificar que el Ohmmapper ya está midiendo. Se desplegará el gráfico de las medición que está realizando y la lectura se puede apreciar en "Field" que está en unidades de $\mu\text{V}/\text{mA}$. "QC" es una medida de la variación de la medición, cuando excede cierto rango comienza a sonar una señal de alerta para indicar que la medida no es muy confiable.
7. Una vez verificado el buen funcionamiento del equipo e ingresada la geometría de la experiencia, seleccionar la opción "Simple Survey" del menú y escoger un archivo para el almacenamiento de los datos.
8. En la opción "Survey Mode" seleccionar Continuo, y en Ciclo de Tiempo seleccionar 0.5 segundos. Esto quiere decir que el Ohmmapper medirá de manera continua cada medio segundo, incluso entre los puntos de medición seleccionados. Con esto se tendrán más datos y por lo tanto medidas más confiables.
9. Seleccionar "Start New Survey". El Ohmmapper está listo para comenzar a medir.
10. Para empezar la medición el operador debe colocarse sobre el primero de los puntos marcados para la medición, apretar MARK en la consola y comenzar lentamente a caminar hacia el punto o marca siguiente.
11. Una vez llegado al próximo punto, apretar nuevamente MARK (no es necesario detenerse, aunque es recomendable), y así sucesivamente hasta llegar al penúltimo punto de medición.
12. Al llegar al último punto de medición hay que apretar END LINE de la consola para informarle a ésta que se acaba de completar una línea de medición.
13. Es recomendable realizar mediciones en el sentido inverso, utilizando la misma geometría, para después corroborar la confiabilidad de las medidas.
14. Una vez que el equipo esta dispuesto en sentido inverso, seleccionar el mismo archivo que se estaba utilizando y seleccionar "Continue Survey", nuevamente el equipo estará listo para comenzar a medir.
15. Repetir los pasos 10, 11 y 12.

16. Para comenzar una nueva línea con un nuevo espaciamento, es necesario, además de cambiar la cuerda a 2.5 m, cambiar la geometría de adquisición de datos como se explico en el paso 4.
17. Comenzar la nueva medición repitiendo los pasos anteriores y variando el largo de cuerda como se indica en la sección Geometría de Adquisición de Datos.
18. Los datos ya están almacenados en el archivo para su posterior procesamiento.
19. Limpiar y guardar el equipo.

2.3.2.2 Análisis e Interpretación de Datos.

Una vez tomados los datos, éstos quedan almacenados en un archivo seleccionado al comienzo de la medición. Para poder visualizar los datos es necesario bajar la información a un computador, utilizando el software MagMap200 que crea un archivo Ascii con los datos. El mismo software lee este archivo y despliega en pantalla la posición de las líneas de medición y además la pseudosección construida con los datos de estas líneas.

Para que puedan analizar e interpretar los datos, se hará entrega tanto de la ubicación de las líneas de medición como de la pseudosección de resistividad aparente. También se entregará un modelo de resistividad construido a partir de la inversión de los datos de la pseudosección.

Para complementar los datos obtenidos, también se hará entrega de los datos de una línea paralela a la de la experiencia, para así interpretar de mejor manera los datos.

2.4 RECOMENDACIONES.

2.4.1 Medidas de Seguridad.

- No tomar ambos cables electrodos del transmisor cuando este esté encendido, debido a que podría producir una descarga eléctrica.
- No operar el equipo sobre agua, debido a que por la mayor conductividad de ésta, podría producir una descarga eléctrica alrededor del equipo.

2.4.2 Cuidados y Mantención del Equipo.

- No encender el Transmisor o receptor cuando no estén conectados los terminales y menos cuando no estén conectados los cables electrodos, ya que puede causar un desperfecto al equipo.
- No dejar las baterías en el Transmisor o Receptor al momento de guardar el equipo.
- Cargar las baterías si han estado un par de meses si usar, para alargar su vida útil.
- Limpiar bien el equipo antes de guardarlo, sobre todo los conectores de los cables electrodos para que dentro de éstos no se acumule tierra que pueda impedir una buena conexión entre ellos.

2.4.3 Confección de Informe

El informe que se debe elaborar debe contener los siguientes puntos como mínimo:

1. Portada.
2. Introducción.
3. Objetivos.
4. Materiales y equipos.
5. Metodología.
6. Análisis e Interpretación de datos.
7. Conclusiones

1.4.4 Desarrollo de módulo.

Antes de comenzar la experiencia, es recomendable realizar una pequeña evaluación a los alumnos sobre los antecedentes teóricos relacionados con el tema para así, desarrollar de una mejor manera el módulo.

El tiempo recomendable para un buen desarrollo del módulo es de 4 horas, por lo que es necesario dividir en dos el módulo o mejor aún, realizarlo un día en que se tenga el tiempo adecuado.