Exploración de aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá (Sector de Las Tablas) mediante métodos geofísicos

Alberto Caballero

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (**www.tdx.cat**) i a través del Dipòsit Digital de la UB (**diposit.ub.edu**) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (**www.tdx.cat**) y a través del Repositorio Digital de la UB (**diposit.ub.edu**) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (**www.tdx.cat**) service and by the UB Digital Repository (**diposit.ub.edu**) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

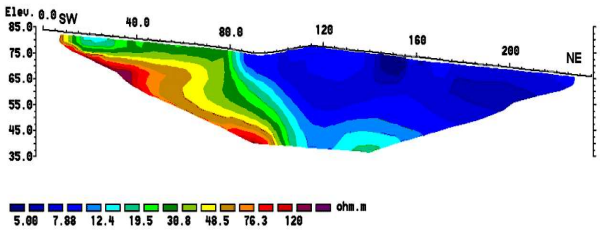
UNIVERSITAT DE BARCELONA

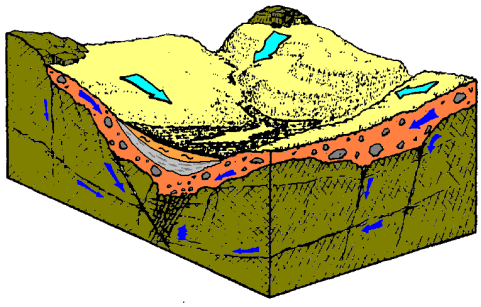
Facultat de Geologia
Departament de Geoquímica, Petrología i Prospecció Geològica

TESIS DOCTORAL

EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL ARCO SECO DE PANAMÁ (SECTOR DE LAS TABLAS) MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS

ALBERTO CABALLERO





Barcelona, 2009

Capítulo 5

Métodos Eléctricos

5.1 Introducción

Los métodos geoeléctricos se utilizan para estudiar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo. La resistividad es una propiedad eléctrica fundamental de los materiales en general y en particular de las rocas. Bajo determinadas condiciones, determinar su distribución a partir de la medición en superficie, puede aportar información útil sobre la estructura o la composición del subsuelo (Seaton & Burbey 2000). Es de particular interés en los estudios hidrogeológicos, ya que permite discriminar de manera efectiva y eficiente, aquellos medios geológicos porosos y permeables en los cuales el agua subterránea fluye o se almacena haciendo posible su aprovechamiento (Kirsch 2006).

En la práctica, se determina la resistividad eléctrica mediante el empleo de diversos tipos de dispositivos de electrodos. En este sentido, el uso de sistemas de resistividad multielectrodos para la adquisición de datos, controlada por microprocesador, se ha convertido en rutina. De aquí que, la obtención de datos en 2-D se ha extendido en los estudios hidrogeológicos, ambientales y geotécnicos (Griffiths & Barker 1993; Loke et al. 2003; Dahlin 1996). Con esta instrumentación, no hay necesidad de cambiar de lugar los electrodos entre las medidas.

Aunque aún se emplean los dispositivos tradicionales tales como el Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo, en la interpretación, con los métodos de inversión, ya no son necesarias las “curvas patrón”. Quizás, en el pasado, esta era la causa de la selección de ciertos dispositivos (Olayinka & Yaramanci 2000; Nyquist et al. 2007).

5.2 Metodología

En este estudio, se analizaron 60 sondeos geoeléctricos distribuidos por toda la zona, de acuerdo al mapa de la figura 5.1; en la práctica, estos se han concentrado en la zona periférica a las poblaciones de Las Tablas, San José, La Palma y Santo Domingo. Estos consisten en 17 sondeos eléctricos verticales

Offset-Wenner (SEV-OW), 34 secciones de tomografía eléctrica (ERT) y 9 sondeos eléctricos verticales con dispositivo Schlumberger (SEV-S).

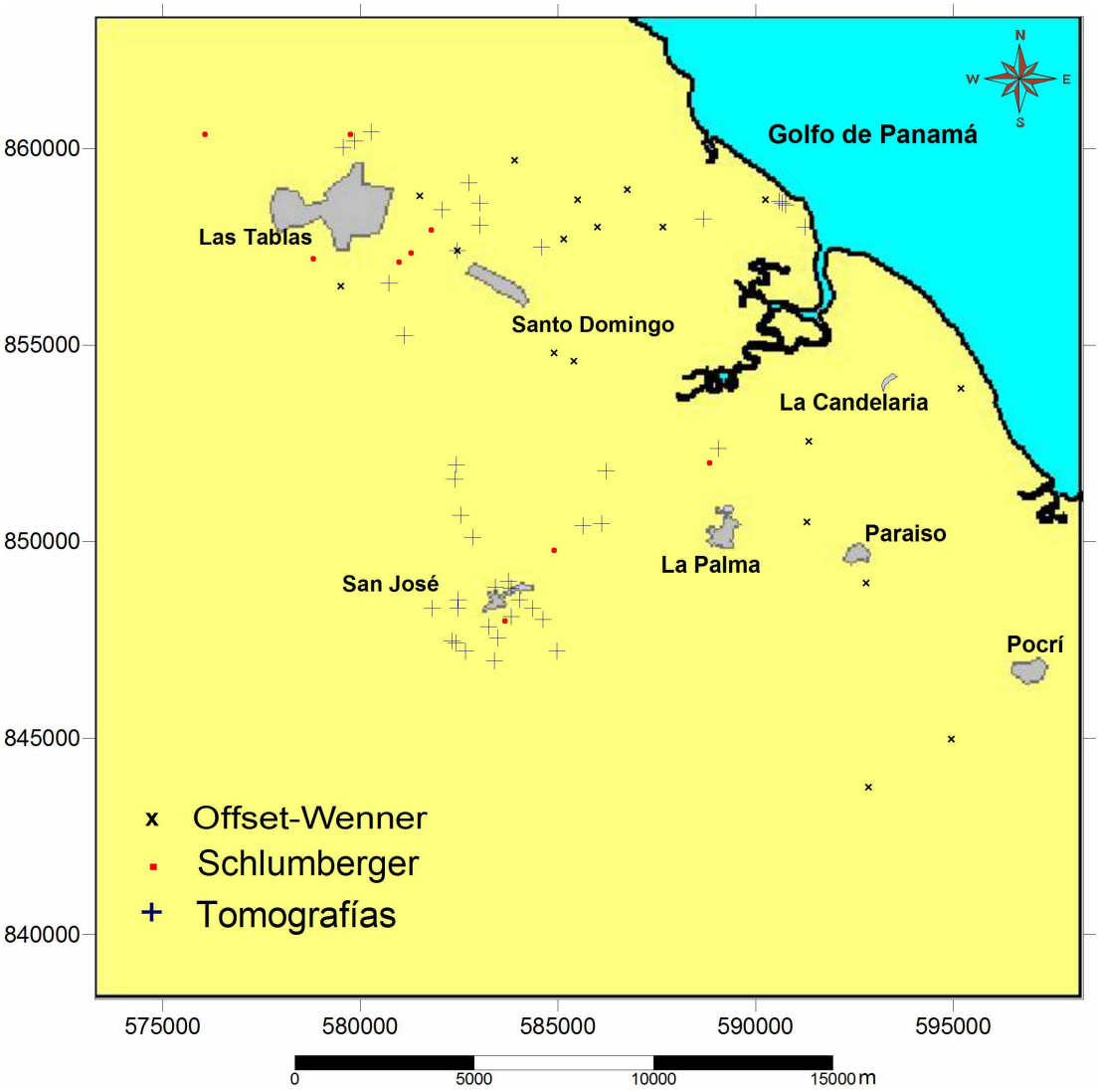


Figura 5.1. Distribución de los diferentes puntos en donde se ha llevado a cabo un reconocimiento geoeléctrico del subsuelo.

Los sondeos Offset-Wenner (SEV-OW) utilizados en este estudio son parte de los datos obtenidos durante una campaña de campo realizada en el año de 1987 por el Grupo Ecaisa (Ecaisa 1987) en la zona de Las Tablas. Para este estudio todas las curvas han sido reinterpretadas, considerando la nueva información geológica obtenida a partir de perforaciones recientes. El equipo utilizado en esta campaña fue un ABEM SAS 300®, Terrameter, con un juego de cables para el dispositivo Offset-Wenner de diez (10) conectores.

Las tomografías (ERT) y los SEV-S fueron realizadas con un resistivímetro Syscal R1-Plus de Iris Instruments, el sistema utiliza un juego de cables con 48

electrodos. Los dispositivos empleados fueron Wenner, Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo. La distancia mínima entre electrodos es de cuatro (4) metros. En el dispositivo Schlumberger la distancia AB/2 máxima es de 200 metros.

Para la interpretación de los datos se empleó el programa Res2Dinv® versión 3.2 (Loke & Barker 1996). La metodología de abordaje de este programa se analizará en otro apartado de este capitulo.

Los sondeos eléctricos verticales (SEV-S y SEV-OW) fueron interpretados utilizando el programa ResixPlus de Interpex®; en este se calcula el problema directo utilizando la teoría del filtro lineal propuesta por Davis et al. (1980). A partir de un modelo inicial, con parámetros fijos o no, dependiendo de la información "a priori" que se disponga, el programa puede resolver el problema inverso mediante el método “Ridge regression” propuesto por Inman (1975). Además, dispone de la posibilidad de efectuar una inversión automática, permitiendo así estimar directamente el corte geoeléctrico, según la metodología propuesta por Koefoed (1976).

5.3 Fundamentos fisico-matemáticos de los métodos empleados

Resolver los problemas geológicos aplicando los métodos de corriente continua (DC), implica llevar a cabo dos etapas importantes, las cuales no se pueden soslayar durante su aplicación. Estas deben considerar, la obtención del modelo (modelo directo), que semeja la respuesta de condiciones del medio y las técnicas de interpretación (inversión de datos) que conllevan un control de la misma afín de evitar ambigüedades y que permita establecer la validez del modelo.

La metodología más utilizada en los procedimientos de campo es la de los cuatro electrodos, que consiste en la inyección de una corriente eléctrica continua I de intensidad conocida entre dos electrodos y la medición de la diferencia de potencial ΔV con otros dos electrodos (Sharma 1997). En esta, uno de los electrodos de corriente se considera positivo por donde circula la corriente que penetra al suelo (A) y el otro electrodo por donde sale negativo (B) y los otros dos electrodos son utilizados para medir el potencial (ver figura 5.2). En esta

configuración las líneas de flujo y equipotenciales se distorsionan por el acercamiento del segundo electrodo de corriente.

Figura 5.2. Disposición de cuatro electrodos en el método eléctrico-resistivo.

La resistividad del medio (*ρ*) se determina cuando se inyecta una corriente I, a uno de los electrodos situados en los puntos **A** y **B** sobre la superficie, donde todos los puntos alrededor de los mismos serán afectados por estos electrodos. El gradiente de potencial que se asocia a está corriente, se mide con otros electrodos que tienen una separación de valor finito (ver figura 5.3).

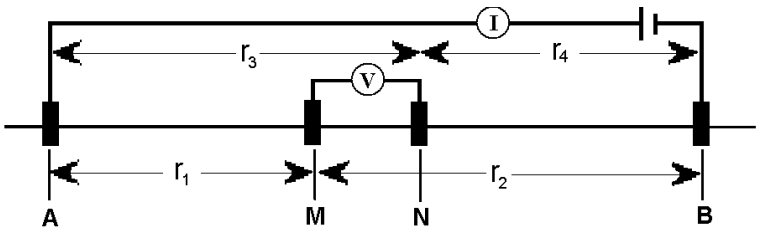


Figura 5.3. Disposición de los electrodos de corriente y potencial.

La diferencia de potencial **Δ**V entre los electrodos M y N será:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi}\left\{\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)-\left(\frac{1}{r_3}-\frac{1}{r_4}\right)\right\} \qquad (5.1)$$

Despejando ***ρ*** de (5.1), se obtiene:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I}\frac{2\pi}{\left\{\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)-\left(\frac{1}{r_3}-\frac{1}{r_4}\right)\right\}} \qquad (5.2)$$

De manera que la relación entre la resistividad, el potencial y la corriente estará dada por:

$$\rho = K\frac{\Delta V}{I} \qquad (5.3)$$

en donde K es el factor geométrico y está dado por:

$$K = \frac{2\pi}{\left\{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right\}} \qquad (5.4)$$

Cuando se determina la resistividad del subsuelo, de manera general, lo que se obtiene es la resistividad aparente (ρ_a). En su determinación contribuyen la distribución de las diferentes unidades geológicas, su geometría y la localización del dispositivo de electrodos con respecto a estas (Wait 1982; Kirsch 2006).

Los sondeos eléctricos verticales (SEV), se realizan mediante la adecuada selección del dispositivo de electrodos, lo cual siempre es función del objetivo planteado.

Una idea clara del tipo de geología que se estudia es importante, ya que, esto ayuda en la decisión del dispositivo de electrodos así como del modelo interpretativo a emplear (Seaton & Burbey 2000; Martorana et al. 2009).

Los valores de resistividad aparente obtenidos, son procesados para obtener la distribución de la resistividad real, la cual será interpretada en términos de la estructura geológica.

De manera general, en el estudio de las estructuras geológicas, basado en sus propiedades físicas, estas se pueden clasificar de acuerdo a su distribución espacial.

Tomando esto en consideración, estas pueden ser homogénea, estratificada, de contactos verticales o aquellas de distribución de forma variada o irregular; las mismas que se pueden estudiar con una metodología determinada, por ejemplo en una dimensión (**1D**), dos dimensiones (**2D**) y en tres dimensiones (**3D**). La figura 5.4, ilustra la distribución de estas geometrías.

En los estudios hidrogeológicos la configuración de dispositivos más empleados, casi siempre, se realiza en forma lineal y los más comunes son los dispositivos Schlumberger, Wenner, Wenner-Schlumberger y dipolo-dipolo (Kirsch 2006).

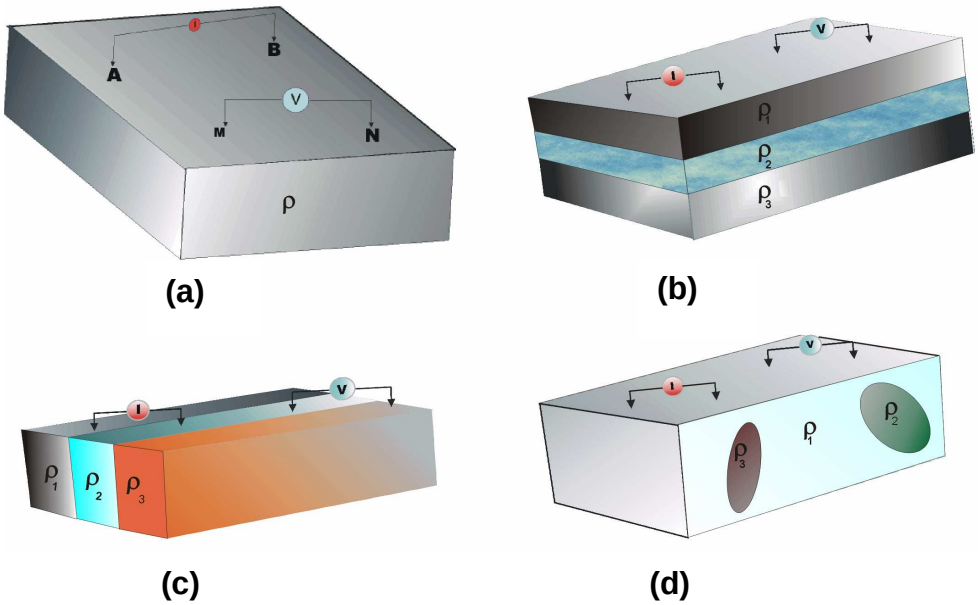


Figura 5.4. Distribución espacial del subsuelo de acuerdo a la distribución de la resistividad (a) homogénea, (b) vertical, (c) distribución horizontal y (d) distribución irregular.

5.3.1 Descripción de los dispositivos de electrodos empleados

5.3.1.1 Método Schlumberger

Con este dispositivo de amplia difusión y aplicación, por la simetría de la disposición de los electrodos, los sondeos geoeléctricos se realizan variando la distancia AB/2, a lo largo de un perfil rectilíneo; realizando en cada década, cambios en MN, para optimizar la sensibilidad del voltímetro.

Para que funcione como un método de gradiente, se acostumbra a usar la regla AB>MN>AB/20; sin embargo, en la práctica se mantiene MN tan pequeño como se pueda, siempre que la lectura del voltímetro sea adecuada (Nyquist et al. 2007).

La sensibilidad decrece con el aumento de la profundidad de exploración, sin embargo, este decrecimiento no es tan rápido como del método Wenner. El factor geométrico, de acuerdo a la figura 5.5, está definido por:

$$K = \frac{\pi}{a}\left(\frac{AB}{2}\right)^2 \qquad (5.5)$$

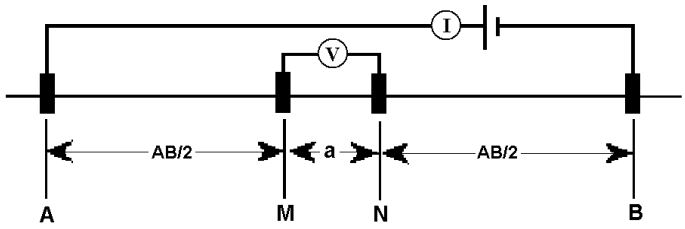


Figura 5.5. Dispositivo Schlumberger.

5.3.1.2 Dispositivo Wenner

En el dispositivo Wenner, los cuatro electrododos se disponen a lo largo de una línea, de manera que el espacio entre estos es el mismo (AM = MN = NB); en la figura 5.6 se ilustra la distribución de los electrodos, existen variantes en este dispositivo, sin embargo, el factor geométrico está dado por:

$$FG_{Wenner} = 2\pi a \tag{5.6}$$

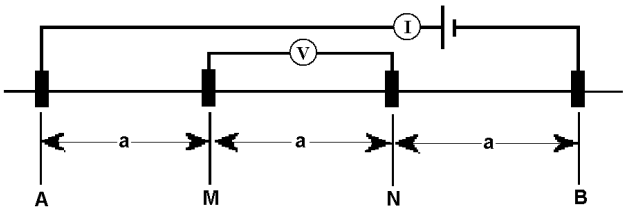


Figura 5.6. Distribución de los electrodos en el dispositivo Wenner

El dispositivo Wenner es muy sensible a los cambios de resistividad vertical en la superficie localizada debajo del centro del dispositivo. Sin embargo, es menos sensitivo a los cambios horizontales en la resistividad del subsuelo. Comparado con otros dispositivos posee una profundidad de investigación moderada, sin embargo tiene la mayor relación señal-ruido (Nyquist et al. 2007).

5.3.1.3 Dispositivo Wenner-Schlumberger

Este dispositivo es un híbrido entre el Wenner y el Schlumberger; lo que lo hace moderadamente sensible a estructuras horizontales y verticales, aunque su sensibilidad difiere ligeramente con la del Wenner. Por estas características, este dispositivo puede ser empleado en aquellas áreas en donde se espera encontrar este tipo de estructuras geológicas; su configuración se aprecia en la figura 5.7 (Loke 2004).

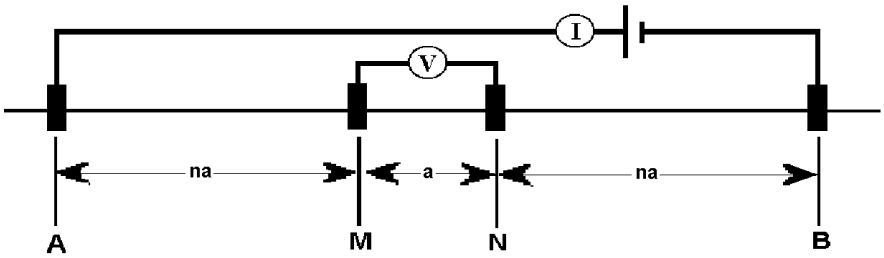


Figura 5.7. Configuración de electrodos del dispositivo Wenner- Schlumberger.

El factor geométrico está dado por:

$$K = \pi n \left(n+1\right) a \qquad (5.7)$$

La profundidad de investigación es ligeramente mayor (10%) a la del dispositivo Wenner, en tanto que la razón señal-ruido es menor que la de éste y mayor que la del dipolo-dipolo, ello es debido a que ésta es inversamente proporcional al cuadrado del valor de "n" (Loke 2004).

5.3.1.4 Dispositivo Dipolo-Dipolo.

Este dispositivo se ha utilizado de forma amplia debido a que el acoplamiento electromagnético entre los circuitos de corriente y de potencial es relativamente bajo; en la figura 5.8, se ilustra la disposición de los electrodos.

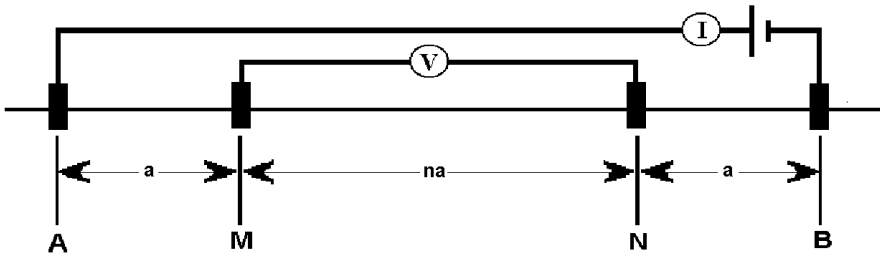


Figura 5.8. Distribución de los electrodos en el dispositivo Dipolo-Dipolo.

En este dispositivo, los electrodos **A**, **B** y **M**, **N** están próximos entre sí, constituyendo un dipolo de corriente y un dipolo de potencial. Un sondeo eléctrico vertical (SEV), se realiza fijando el dipolo de corriente y desplazando el dipolo de potencial. De manera que, el espaciado "**a**" se mantiene fijo y el factor "**n**" se va incrementando de 1 a 2 luego a 3 hasta, quizás, el valor 6; con esto se pretende aumentar la profundidad de investigación. El factor geométrico está dado por:

$$K = \pi n (n+1)(n+2) a \qquad (5.8)$$

De manera general, este dispositivo tiene una profundidad de investigación menor a la del Wenner, sin embargo, su sensibilidad a estructuras verticales someras es mayor. Una posible desventaja del dispositivo, es su baja relación señal-ruido con el incremento de "**n**"; debido a que el voltaje decae de forma inversamente proporcional al cubo del factor "**a**". Esta desventaja puede ser en parte superada aumentando el valor de la separación "**a**", con lo que se reduce la caída del potencial.

Hay que tener en cuenta que el dispositivo aporta poca información de la zona circundante al punto investigado y en la distribución de los datos en la pseudosección, no refleja la superficie del subsuelo a partir de la resistividad medida. Por otro lado, es muy sensible a las variaciones horizontales de la resistividad, sin embargo no a los cambios en la vertical; lo que lo hace útil en el estudio de estructuras verticales, tal como lo es el caso de los diques y cavidades. Sin embargo, su sensibilidad a las estructuras horizontales es muy baja (Loke 2004; Martorana et al. 2009).

5.3.1.5 Dispositivo Offset-Wenner

En los sondeos eléctricos verticales existe un conjunto de efectos indeseables. Uno de estos es la alta sensibilidad a las variaciones laterales próximas a la superficie, de aquí la necesidad de emplear una metodología que reduzca esta influencia. Otra desventaja de los sondeos eléctricos convencionales es el tiempo empleado en mover los electrodos entre una medida y otra. Quizás una forma de reducir este tiempo sería mediante el empleo de un cable múltiple, el cual estaría conectado a todos los electrodos. Una vez que se ha instalado el cable el espaciamiento entre medidas puede ser cambiado sin necesidad de moverlos o aumentar el número de electrodos. Para el caso, se emplearía un número razonablemente pequeño de electrodos con un cable múltiple (Barker 1981).

5.3.1.5.1 Ventajas de la aplicación del sondeo eléctrico Offset Wenner

Como se ha mencionado en el apartado anterior, uno de los problemas que más afecta y se repiten en todos los sondeos resistivos es causado por los efectos producidos por las variaciones locales que se encuentran próximas a la superficie. Estos efectos laterales, pueden distorsionar los gráficos del sondeo, de manera que la interpretación se hace difícil y en algunas veces imposible. En este sentido, son varios los dispositivos de electrodos y técnicas de campo que se han diseñado para reducir el efecto lateral, entre los que podemos mencionar esta el dispositivo cuadrado (Habberjam & Watkins 1967a), el dispositivo dipolo-multidipolo (Merrick 1974) y el dispositivo de tripotencial suavizado (Habberjam & Watkins 1967b).

Estas metodologías involucran un procedimiento de campo muy laborioso y las curvas de resistividad aparente requieren el empleo de técnicas de procesado e interpretación no convencionales (Barker 1981).

El empleo del dispositivo Offset Wenner obvia todas las dos desventajas arriba mencionadas, reduce significativamente y en algunos casos elimina los efectos de resistividad lateral (Barker 1981).

En el caso del dispositivo schlumberger, entre los dos electrodos adyacentes la respuesta obtenida próxima a la superficie, puede ser positiva o negativa y cerca de los electrodos se alcanzan valores muy altos.

En un sustrato homogéneo las contribuciones positivas o negativas de grandes magnitudes se cancelan unas a otras y la señal resultante se origina principalmente en profundidad y no en la región situada alrededor de los electrodos. El efecto de las zonas positivas o negativas puede ser mejor apreciado si colocamos un cuerpo de alta resistividad en un medio homogéneo. Si este es colocado en la zona positiva la resistencia medida será mayor que si se hubiera medido en ausencia del cuerpo. Si se localiza en la zona negativa la resistencia medida será menor. En ambos casos, se afirma que el cuerpo causa un error en la medida de la resistencia (Barker 1981).

El efecto del cuerpo puede ser reducido, colocando el dispositivo de manera que el cuerpo este en la zona negativa, se mide la resistencia. Luego, se desplaza el dispositivo de manera que el cuerpo esté localizado sobre la zona

positiva y se repite la medida de la resistencia. Si las resistencias alta y baja son promediadas el efecto del cuerpo es eliminado o reducido. El problema de saber si el cuerpo se encuentra en la parte positiva o en la parte negativa se resuelve mediante el empleo del dispositivo Wenner.

En la figura 5.9 se comparan perfiles Wenner y Offset Wenner sobre una esfera conductora. En este, se observa que el efecto espurio de la esfera es reducido por un factor de tres (3) independientemente de la posición de la esfera. La respuesta parece mejorar cuando la variación lateral está próxima a la superficie, aunque, es menos efectiva en fuentes profundas. En la figura 5.10, se ha agregado un perfil Schlumberger para comparación y ampliación.

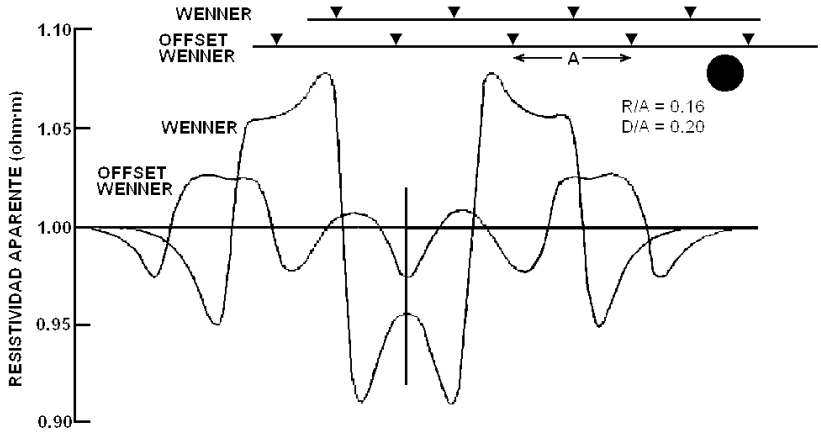


Figura 5.9. Comparación de los perfiles horizontales Wenner y Offset Wenner sobre una esfera conductora. R = Radio de la esfera, D = Profundidad del centro de la esfera. Modificado de Barker (1981).

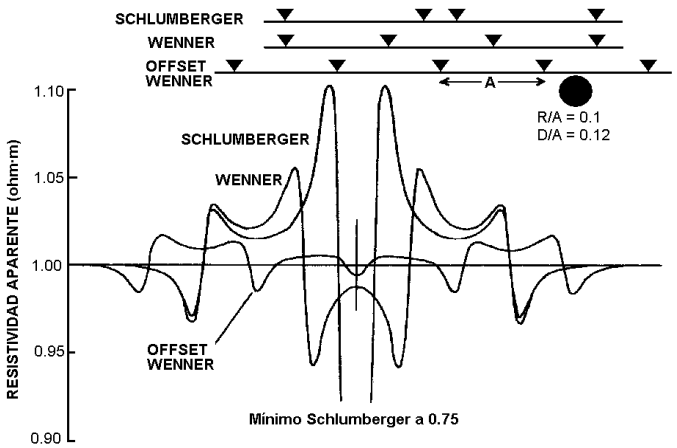


Figura 5.10. Comparación de los perfiles horizontales Wenner y Offset Wenner y Schlumberger sobre una esfera conductora. R = Radio de la esfera, D = Profundidad del centro de la esfera. Modificado de Barker, (1981).

5.3.1.5.2 Sondeo Eléctrico Offset Wenner.

Por conveniencia, el sondeo eléctrico Offset Wenner se realiza con el empleo de cinco (5) electrodos, tal como se muestra en la figura 5.11. En la práctica, esto no implica una dificultad con respecto a los sondeos tradicionales, porque el electrodo adicional permanece fijo en el centro del arreglo.

En el proceso de medición, un conmutador electrónico permite el cambio de cuatro (4) electrodos adyacentes al otro. De manera que las resistencias (en este caso R_{D1} y R_{D2}) se miden mediante el dispositivo Wenner normal. Para obtener la resistencia del dispositivo Offset Wenner R_D, se calcula el promedio de los dos valores obtenidos.

5.3.1.5.3 Obtención de los datos mediante cables multielectrodos.

Mediante la metodología del Offset Wenner los sondeos eléctricos se caracterizan porque que se reduce el número de electrodos necesarios. En este dispositivo, el espacio se incrementa de acuerdo a la serie: $a = 2^n$ (1, 2, 4, 8,…, 64 m), de manera tal que el electrodo interno siempre cae en la posición previamente ocupada por un electrodo de corriente.

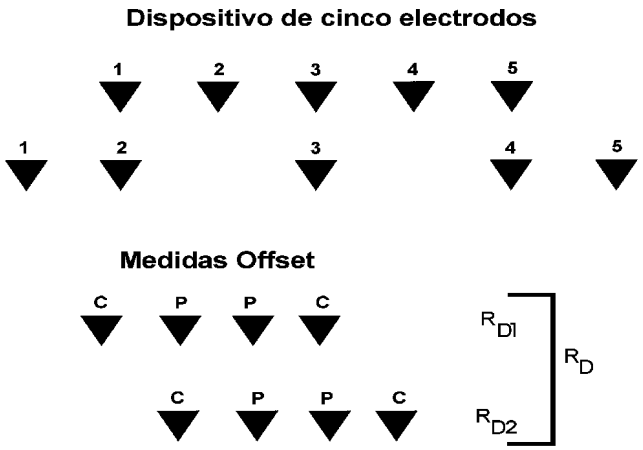


Figura 5.11. Configuración de los electrodos en el dispositivo Offset Wenner. Obsérvese la disposición fija del electrodo central. Modificado de Barker, 1981.

De acuerdo a esto, se obtienen 7 medidas de resistencia de alta calidad (bajo ruido), empleando un total de ocho electrodos por medio dispositivo (figura 5.11), de electrodos.

Se pueden obtener puntos adicionales en la curva de resistividad aparente, estos se obtienen por el intercambio en la posición de los electrodos y no mediante el cambio del espaciamiento. De acuerdo a ello, se obtendría la medición de las resistencias R_B y R_C tal como se ilustra en la figura 5.12. En este caso, es evidente que se emplea el mismo dispositivo de cinco electrodos, pero se mantiene el mismo espaciamiento y como consecuencia de ello hay un intercambio en la función de los electrodos de corriente y potencial.

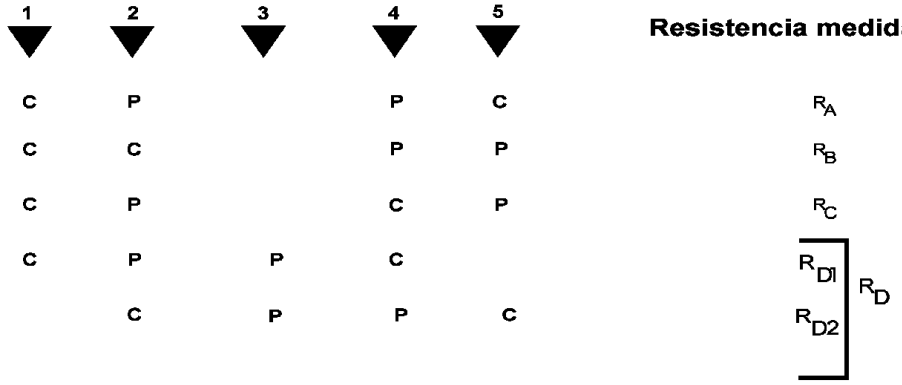


Figura 5.12. Distribución de los cinco electrodos del dispositivo Offset Wenner para la medición de las resistencias Wenner. Modificado de Barker (1981).

En este punto es necesario definir la resistencia Wenner en términos del potencial de una fuente de corriente puntual en superficie. Si la corriente **I** entra en el subsuelo a través del electrodo C1 y sale por C2 la resistencia medida se define por:

$$R_w(a) = \frac{\Delta V}{I} = \frac{(V_{P1} - V_{P2})}{I} \qquad (5.9)$$

$$= \left[(V_{P1C1} - V_{P1C2}) - (V_{P2C1} - V_{P2C2})\right] / I \qquad (5.10)$$

donde V_{P1C1} es el potencial en P1 debido a la corriente que entra en el suelo por C1 y $R_w(a)$ es la resistencia de Wenner medida con el espaciado a. Si C1 es una unidad fuente de corriente, entonces V_{P1C1} puede estar representado por Ø (a), el

potencial a una distancia a, producido a partir de una fuente de corriente. De ahí que para una superficie horizontal estratificada se tiene que:

$$V_{P1C1} = V_{P2C2} = \Phi(a) \qquad y \quad V_{P2C1} = V_{P1C2} = \Phi(2a) \tag{5.11}$$

Estos términos pueden ser combinados para obtener la definición de la resistencia Wenner (Carpenter 1955)

$$R_w(a) = [2\phi(a) - \phi(2a)] \Big/ I \tag{5.12}$$

Si las resistencias R_B y R_C pueden ser definidas de manera similar esto dará como resultado que:

$$R_B(a) = [\phi(2a) + \phi(4a) - 2\phi(3a)] \Big/ I \tag{5.13}$$

$$R_C(a) = [2\phi(a) - \phi(2a) - \phi(4a)] \Big/ I \tag{5.14}$$

Como algunas resistencias se obtienen de forma indirecta, estas expresiones se pueden combinar para obtener su valor, como por ejemplo:

$$R_C(a) - R_w(a) = [\phi(2a) - \phi(4a)] \Big/ I \tag{5.15}$$

$$= \frac{1}{2} R_w(2a) \tag{5.15a}$$

por ello:

$$R_w(2a) = 2[R_c(a) - R_w(a)] \tag{5.16}$$

Esta relación nos permite, por ejemplo, obtener la resistencia Wenner medida a los 128 m, a partir de las medidas de resistencia hechas con el espaciamiento de 64 metros.

En la práctica, para obtener el último punto en el gráfico de resistividad aparente, tipo Wenner, sería necesario utilizar el obtenido a la mitad del máximo espaciamiento requerido.

Existen otras formas de obtener puntos Wenner intermedios, pero uno de los más satisfactorios viene dado por:

$$R_w(3a) = \frac{1}{2} R_W(2a) + R_B(2a) - R_B(a) + \frac{1}{2} R_W(4a) \tag{5.17}$$

A partir de esta ecuación pueden calcularse las resistencias Wenner en las posiciones 3, 6,12, 24, 48 y 96, aunque estas posiciones no hayan sido medidas directamente en el campo. Esto es posible ya que todas las resistencias a la derecha de la ecuación (5.17) se obtienen a partir de las mediciones hechas en las posiciones 1, 2, 4, 8,…..64.

En resumen, es posible emplear el dispositivo de cinco electrodos Offset Wenner y las posiciones 1, 2, 4, 8, 16, 32 y 64 m (solo 8 electrodos por mitad del dispositivo), para obtener un gráfico Wenner de resistividad aparente de 14 puntos. De estos 14 valores, siete (7) son Offset Wenner de precisión, los cuales podrían estar exentos de efectos de resistividad lateral. Los otros seis (6) puntos intermediarios tienen casi la misma calidad, pero son más sensibles a las variaciones laterales de la resistividad próximas a la superficie. En la Tabla 5.1, se presenta un resumen de los valores obtenidos en un sondeo particular y los valores de las resistencias y resistividades obtenidas.

Tabla 5.1. Valores de resistencias, resistividad aparente y control de errores calculados a partir de las mediciones correspondientes. Tomado de Ecaisa (1987).

Sondeo Eléctrico Vertical **LP-12**

Dispositivo Offset Wenner

a 2.0 Km al E de Las Tablas

Fecha 5 / 12 / 1986

Coordenadas UTM 58150 E 85880 N

Resultados de Campo

Lecturas (ohmios)

Posición del Selector	A	C	D 1	D 2	B
1	4.43	4.13	4.28	3.94	0.342
2	1.747	1.643	1.411	1.339	0.1000
3	0.785	0.723	0.537	0.563	0.0504
4	0.517	0.485	0.320	0.378	0.0330
5	0.402	0.379	0.239	0.296	0.0240
6	0.315	0.295	0.1856	0.211	0.0208
7	0.224	0.208	0.1329	0.1776	0.0157
8	0.159	0.1504	0.1002	0.1208	0.0103

Valores Calculados

Errores (%)			Espaciamiento	Resistividad Aparente
Observación	Offset	Lateral	(m)	(Ohm.m)
0.95	8.27	99.83	0.5	12.9
0.23	5.24		1	8.6
		1.86	1.5	6.8
1.48	4.73		2	6.9
		2.22	3	7.5
0.19	16.62		4	8.8
		1.33	6	10.9
0.25	21.31		8	13.4
		11.98	12	16.9
0.25	12.81		16	19.9
		24.09	24	26.2
0.13	28.79		32	31.2
		4.27	48	38.5
1.07	18.64		64	44.4
			96	53.6
			128	62.9
Raiz Cuadrada de la Media de los Cuadrados.				
0.75	16.54	39.17		

El punto final de la curva, debido al proceso de cálculo, puede ser el más afectado por las variaciones laterales próximas a la superficie que los otros

puntos. Su precisión se puede evaluar mediante el análisis del “error Offset”. Es interesante resaltar que el cálculo de los puntos intermedios de la curva de resistividad aparente utilizando la ecuación (5.19), no es una forma de interpolación entre las medidas de resistividad Wenner realizadas. De hecho, las resistencias R_B y R_C incluyen información esencial no incluida en las resistencias Wenner medidas, en este caso R_{D1} y R_{D2} (Barrer, 1981).

Debido al pequeño número de electrodos empleados en este sistema, es posible utilizar un par de cables multielectrodos, conectados a las distancias 1, 2, 4, 8, 16, 32 y 64m, medidos a partir de un electrodo central. Con ello es posible medir suficientes resistencias que permitan la construcción del gráfico de resistividad aparente en catorce (14) puntos. El espaciado se intercambia mediante un conmutador conectado a los cables.

5.3.1.5.4 Calculo del Efecto de Resistividad Lateral.

Una ventaja del dispositivo Offset Wenner es que proporciona una estimación de la magnitud del efecto lateral de la resistividad sin necesidad de medidas de resistencia adicional. Esta estimación viene expresada por el “error offset”, definido por la expresión siguiente:

$$e_f(a) = \frac{R_{D1}(a) - R_{D2}(a)}{R_D(a)} \times 100\ \% \qquad (5.18)$$

El error offset a la separación **a** se define claramente en términos de la figura 5.12. Si el error e_f (a) es mayor a 10 % la interpretación de la resistividad aparente puede considerarse un error significativo.

Aunque la técnica reduce sustancialmente los efectos laterales próximos a la superficie, las grandes variaciones laterales en profundidad, tales como las capas inclinadas y las fallas pueden distorsionar las curvas de los sondeos de forma apreciable. En este caso el error offset es un indicativo de estas situaciones.

5.3.1.5.5 Calculo del error de observación

Los errores de observación pueden ser calculados mediante el empleo de la relación “Tripotencial”, descrita por Carpenter & Habberjamm (1956). Para realizar esto, es necesario medir la resistencia R_A descrita en la figura 5.12. Para ello la relación tripotencial se define por:

$$R_A = R_B + R_C \tag{5.19}$$

debe aplicarse al error observacional, para cualquier geología del subsuelo y cualquier espacio. De aquí que el error observacional e_{obs} puede ser calculado por:

$$e_{obs} = \frac{R_A(a) - [R_B(a) + R_C(a)]}{R_A(a)} \times 100 \quad \% \tag{5.20}$$

Estos errores normalmente deberán variar entre -5 % y 5 %. Estos valores deberán incluir todos los pequeños errores instrumentales y del observador. En el caso de que el e_{obs} fuera muy grande o consistentemente fuera de estos límites, será necesario encontrar la fuente del error. Estos errores generalmente se producen por mal funcionamiento instrumental, escape de corriente a partir de cables rasgados o dañados o una resistencia de contacto alta entre los electrodos. Tomar en consideración estos errores, nos lleva a obtener resultados fiables (BarKer 1981).

5.3.2 Profundidad de investigación.

En los sondeos electroresistivos, la práctica ha indicado que, cuando se aumenta la separación entre los electrodos de un dispositivo, se detectan las capas más profundas. Partiendo de esto, resulta la interrogante con respecto a la profundidad de investigación de un dispositivo. Esta, puede ser respondida al integrar la función de sensibilidad con la profundidad (Edwards 1977). Sin embargo, hay que destacar que las profundidades obtenidas son estrictamente válidas para un modelo del subsuelo homogéneo. Cuando existan grandes contrastes de resistividad cerca de la superficie, la profundidad de investigación podría ser diferente.

En un dispositivo, la función de sensibilidad, es un indicativo del efecto que tiene en la medida del potencial, el cambio en la resistividad de una sección del subsuelo. Mientras más alto sea el valor de la función de esta, mayor será la influencia de la zona del subsuelo sobre la medición; lo que se desea es determinar el cambio en el potencial medido en superficie por un dispositivo cuando varía la resistividad de un estrato (McGillivray & Oldenburg 1990; Loke 2004).

5.3.3 Obtención de la función de resistividades de un medio estratificado.

Para la obtención de la función de resistividad de un medio estratificado se analiza la distribución presentada en Figura 5.13.

En el caso de un medio estratificado, Stefanesco et al. (1930), estableció la relación del potencial y la resistividad aparente en términos de las ecuaciones siguientes (Hooversten et al. 1982):

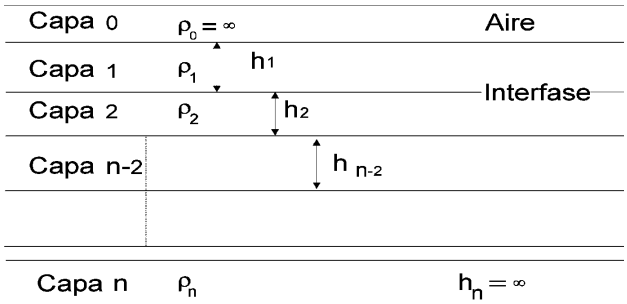


Figura 5.13. Distribución de los estratos en un medio homogéneo e isótropo.

$$V(r) = \frac{\rho_1 I}{2\pi}\left[\frac{1}{r} + 2\int_0^{\infty} \theta_1(\lambda, K, t) J_0(\lambda r)\, d\lambda\right] \tag{5.21}$$

y

$$\rho(r) = \rho_1\left[1 + 2r^2\int_0^{\infty} \theta_1(\lambda, k, t) J_1(\lambda r)\, \lambda\, d\lambda\right] \tag{5.22}$$

donde:

I es la corriente eléctrica aplicada,

r es la distancia del punto de medida a la fuente,

V(r) es el potencial del electrodo a $r = \frac{AB}{2}$,

$\rho_{(r)}$ es la resistividad aparente,

ρ_1 es la resistividad aparente de la primera capa,

J_0 y J_1 son las funciones de Bessel de orden cero y primero respectivamente,

$\theta_1(\lambda, k, t)$ es el kernel de Stefanesco en donde λ es la variable de integración, K el coeficiente de reflexión y *t* es el espesor de la capa. En razón de su manejo y aplicación, las relaciones (5.21) y (5.22), han sufrido algunas transformaciones en su forma, sin embargo el concepto original es el mismo (Koefoed 1976; Hoverstein et al. 1982).

Debe tenerse en cuenta que el potencial definido en (5.21) está basado en los supuestos siguientes (Koefoed 1979; Stefanesco 1930):

a. El subsuelo está constituido por un número finito de capas, separadas cada una por un plano horizontal y la última capa tiene un espesor infinito, en tanto que las superiores tienen un espesor finito.
b. Cada una de las capas es eléctricamente homogénea e isotrópica.
c. El campo eléctrico es generado por una fuente puntual, localizada en la superficie del terreno.
d. La fuente emite una corriente directa.

Estas condiciones, en la práctica son muy aproximadas, de ahí el desarrollo de técnicas de interpretación numérica que tomen en consideración las variaciones a estos postulados; esto permite la ventaja de una mejor caracterización del medio geológico (Medeiros & Lima 1990).

5.3.3.1 Concepto de resistividad aparente

5.3.3.1.1 Expresión de la resistividad en el dispositivo Wenner

La ecuación (5.21) puede rescribirse como:

$$V(r) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty K(\lambda) J_0(\lambda r)\, d\lambda \qquad (5.23)$$

donde:

$$K(\lambda) = 1 + 2\theta_1(\lambda, k, t) \qquad (5.24)$$

K(λ) es conocido como el Kernel de Slichter (1933).

En el dispositivo Wenner la resistividad aparente en un terreno homogéneo está dada por:

$$\rho_{aw} = \left(\frac{\Delta V}{I}\right) 2\pi a \qquad (5.25)$$

Por lo que al aplicar esta relación en la ecuación (5.23), la resistividad aparente en este dispositivo está dada por:

$$\rho_{aw} = 2a\int_0^{\infty} T(\lambda)\left[J_0(\lambda a) - J_0(2\lambda a)\right] d\lambda \qquad (5.26)$$

en donde **a** es la apertura de electrodos consecutivos y T(λ) la transformada de la resistividad propuesta por Koefoed (1970) definida por:

$$T(\lambda) = \rho K(\lambda) \qquad (5.27)$$

La expresión (5.26), puede ser representada en notación logarítmica con el objetivo de facilitar su utilización de forma numérica, si se hace la transformación de variables siguientes:

$$x = \ln(s) = \ln(a) \qquad y \qquad y = -\ln(\lambda) \qquad (5.28)$$

sustituyendo estas variables en la ecuación (5.26) resulta lo siguiente:

$$\rho_{aw} = 2\int_{-\infty}^{\infty} T(y)\left[J_0\left(e^{x-y}\right) - J_0\left(2e^{x-y}\right)\right] e^{(x-y)} dy \qquad (5.29)$$

5.3.3.1.2 Expresión de la resistividad en el dispositivo Schlumberger.

Considerando que la resistividad en este dispositivo se puede expresar en la forma:

$$\rho_{aSch} = -\frac{2\pi s^2}{I}\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_{r=s} \qquad (5.30)$$

Al aplicar esta operación sobre la ecuación (5.21) el resultado es:

$$\rho_{aSch} = \rho_1 + 2\rho_1 s^2 \int_0^{\infty} \theta_1(\lambda) J_1(\lambda s)\, \lambda\, d\lambda \qquad (5.31)$$

en donde $J_1(\lambda s)$ es la función de Bessel de orden uno y ***s*** es la apertura AB/2.

Si tomamos en consideración la ecuación (5.24) y la transformada de la resistividad definida en (5.27) la ecuación (5.31) resulta en:

$$\rho_{a\,Sch} = \rho_1 + s^2 \int_0^{\infty} (T(\lambda) - \rho_1)\, J_1(\lambda s)\, \lambda\, d\lambda \qquad (5.32)$$

Esta ecuación es la que se emplea para el cálculo de la resistividad aparente en el dispositivo Schlumberger.

La ecuación (5.32) puede ser representada en notación logarítmica empleando las transformaciones en (5.28), de manera que la relación obtenida es:

$$\rho_{aSch} = \rho_1 + \int_{-\infty}^{\infty} [T(y) - \rho_1]\, J_1\left(e^{x-y}\right) e^{2(x-y)}\, dy \qquad (5.33)$$

Las ecuaciones (5.29) y (5.33) son adecuadas para el tratamiento digital ya que expresan una integral de convolución. De acuerdo a Ghosh (1971a, b), esto es posible, ya que existe una relación lineal entre la transformada de la resistividad y la función de resistividad aparente, aplicable en todos los dispositivos. De aquí que, se pueda realizar el cálculo del modelo directo de manera simplificada. Es por ello que las ecuaciones (5.29) y (5.33) pueden rescribirse para valores discretos de T(y) de la forma:

$$\rho_a = \sum_{-\infty}^{\infty} f_j \left(T\left(y_0 + j\Delta y\right)\right) \qquad (5.34)$$

donde f_j representa los coeficientes del filtro y $T(y_0 + j\Delta y)$ representa la función de entrada basada en los parámetros del modelo en este caso ρ_i y h_i (Koefoed 1979).

5.4 Interpretación de los datos geoeléctricos.

Aparte del problema de la determinación de un modelo de ajuste de los datos, también existe el de estimar la precisión de los parámetros (Martorana et al. 2009).

En los sondeos Schlumberger sobre capas horizontales, el problema es la no linealidad en los parámetros estimados tal como la resistividad y el espesor de cada capa.

Para el análisis de inversión **1D** de los sondeos eléctricos verticales (SEV) se utiliza la ecuación (5.22) en el cálculo del modelo directo y se realiza una expansión de Taylor para los parámetros estimados dada por (Inman 1975):

$$\Delta G = A\Delta P + \varepsilon \tag{5.35}$$

Con $$[\Delta G]_i = G\left(P, X^i\right) - G\left(P^0, X^i\right);\ i = 1, n$$

y $$[A]_{ij} = \left.\frac{\partial G(P,X)}{\partial P_j}\right|_{\substack{X=X^i \\ P=P^0}} \tag{5.36}$$

que es la matriz de sensibilidad además,

$$\left[\Delta P\right]_j = P_j - P_j^0 \quad ;\ j = 1, m \tag{5.37}$$

en donde:

P es el vector de parámetros desconocidos,

$\mathbf{P}^0$ es el vector de parámetros iniciales,

$\mathbf{X}^i$ parámetros conocidos tales como AB/2,

G ($\mathbf{P}^0$, $\mathbf{X}^i$) la resistividad aparente de la estructura estratificada indicada por $\mathbf{P}^0$,

G (**P**, $\mathbf{X}^i$) la resistividad aparente medida y

ε es el vector de error en los datos.

El estimador de mínimo cuadrado $\Delta\bar{P}$ de ΔP está dado por:

$$\Delta\bar{P} = \left(A^t A\right)^{-1} A^t \Delta G \tag{5.38}$$

No siempre los datos convergen rápidamente a una respuesta satisfactoria, por ello, para evitar variaciones muy grandes cuando $A^t A$ es singular, se introduce el estimador de $\Delta\bar{P}$ y la ecuación (5.38) queda de la forma siguiente:

$$\Delta\bar{P} = \left(A^t A + \kappa I\right)^{-1} A^t \Delta G \tag{5.39}$$

en donde I es la matriz de identidad y $\kappa \geq 0$. Esta variante hace que el proceso de inversión sea más estable, lo que asegura la convergencia a partir de un modelo inicial, no muy próximo al real. La variación de κ, con el objeto de lograr la estabilidad y la rápida convergencia durante la inversión es lo que se conoce como "*Ridge Regression"* y es una técnica derivada de los mínimos cuadrados simples (Rijo et al. 1977).

Cuando el algoritmo converge $\Delta\bar{P} \rightarrow 0$ y se obtiene un estimado de la varianza a partir de la prueba de chi-cuadrado expresada de la forma:

$$\chi^2_p = \frac{\Delta G^T \Delta G}{n - m} \tag{5.40}$$

en donde (n-m) es la expresión del grado de libertad (siendo que n es el número de datos y m es el número de parámetros).

5.5 Interpretación de datos en dos dimensiones

5.5.1 Introducción.

La práctica de los sondeos eléctricos en 2D y 3D, es ya una metodología utilizada en el estudio de la distribución de las propiedades eléctricas del subsuelo a profundidades someras. Esta información, generalmente es obtenida en estudios geológicos, hidrogeológicos, arqueológicos, de problemas ambientales y en la ampliación de los estudios geotécnicos en las obras civiles (Seaton & Burbey 2000; Seaton & Burbey 2002; Grifiths & Barker 1993; Olayinka & Yamaranci 2000; Dahlin 1996; Monteiro Santos et al. 2006; Boonchaisuk et. al. 2008; Martorana et al. 2009).

El empleo de estas técnicas ha aumentado debido al desarrollo de los equipos con dispositivos multielectrodos automatizados. Paralelamente a esto, los métodos de interpretación han evolucionado, sobretodo por el auge y acceso a rápidos y eficientes ordenadores (Dahlin 1996; Olayinka & Yaramanci 2000; Barker 1992; Loke & Barker 1996; Olayinka & Yaramanci 2002; Casas et al. 2008).

Como resultado de esto, en un tiempo relativamente corto, se obtienen pseudo-secciones de alta definición a partir de una densa muestra de datos, con profundidades que pueden alcanzar hasta los 100 metros (Robain et al. 1999).

A pesar de la eficiencia en la toma de datos, su interpretación dependiendo del problema analizado, puede resultar difícil; esto puede deberse a la influencia de la equivalencia, la fortaleza de los algoritmos de inversión y al número de capas o cuerpos empleados en los datos del modelo. En esta fase del proceso, la habilidad del interprete y el conocimiento del medio son esenciales (Olayinka & Yaramanci 2000; Monteiro Santos et al. 2006).

5.5.2 Resolución del Problema Directo

En el análisis en dos dimensiones se emplea el Programa RES2DINV, basado en Loke & Barker (1996). En este, se resuelve numéricamente una ecuación diferencial, considerando una fuente 3D de un electrodo en contacto galvánico con el suelo, la que se define través de la ecuación de Poisson dada por:

$$-\nabla\cdot\left[\sigma(x,z)\nabla\phi(x,y,z)\right]=I(x,y,z) \qquad (5.41)$$

en donde $\sigma(x,z)$ es la distribución de la conductividad en 2D, $\phi(x,y,z)$ es la distribución 3D del potencial eléctrico, $I(x,y,z)$ es la amplitud de la corriente en el modelo 2D (Loke & Barker 1996).

Los complejos problemas geológicos en 2D se resuelven empleando técnicas numéricas, basadas en las diferencias finitas o elementos finitos (Carrasquilla 2004; Dey & Morrison 1979). En estos casos, el medio geológico es subdividido en elementos rectangulares o triangulares, en cuyos vértices se obtiene una solución aproximada de la ecuación diferencial.

La forma usual de resolver el problema 2D-3D es su transformación en uno 2D-2D, a través de la transformada de Fourier de 5.41 (Sasaki 1989):

$$-\nabla\cdot\left[\sigma(x,z)\nabla\vec{\phi}\left(x,k_y,z\right)\right]+k_y\,\sigma(x,z)\vec{\phi}\,(x,k_y,z)=I\left(x,y,z\right) \qquad (5.42)$$

En donde $\vec{\phi}\,(x,k_y,z)$ es la transformada de 2D en la dirección *y* del potencial $\phi\,(x,y,z)$ y k_y es la variable de transformación.

5.5.3 Métodos de Inversión en 2-D:

5.5.3.1 Inversión por "Smoothness constrained" (suavizado forzado). Norma L_2.

En la inversión de datos electroresistivos, el subsuelo es parametrizado dividiendo el modelo en un número determinado de bloques de resistividad constante. En este sentido, la respuesta eléctrica es una función no-lineal del modelo de parámetros, de manera que se lineariza mediante una expansión en serie de Taylor del primer orden y el empleo del modelo inicial estimado; la ecuación resultante en este caso puede ser escrita en forma matricial como (Sasaki 1989; Sasaki 1992):

$$\mathbf{\Delta d} = \mathbf{A}\,\mathbf{\Delta P} \tag{5.43}$$

en donde $\mathbf{\Delta d}$ es el vector que contiene las diferencias (errores) entre los datos del modelo y las medidas, $\mathbf{\Delta P}$ es el vector de ajuste del modelo de parámetros y $\mathbf{A}$ es el Jacobiano o la matriz de las derivadas parciales de la función del modelo con respecto a los parámetros.

En todo proceso de inversión, se hace necesario tener un control de la eficiencia del mismo, por ello para estabilizarlo es necesario imponer restricciones sobre $\mathbf{\Delta P}$, de manera que, el cambio en el modelo sea tal que el error residual esté dentro de una tolerancia establecida; esto es una ventaja, considerando que regula la aparición de valores espurios de la resistividad, que resultan al dividir la sección 2-D en valores menores a la resolución espacial de los datos (Sasaki 1989).

El "smoothness constrained" (suavizado forzado), una modificación del método de Gauss-newton, establece una relación para el ajuste de los parámetros dada por (Sasaki, 1992; Loke & Barker, 1996):

$$\mathbf{\Delta P} = (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{A} + \lambda\,\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{C})^{-1}\,\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{\Delta d} \tag{5.44}$$

en donde λ es un multiplicador lagrangiano (factor de amortiguamiento), $\mathbf{C}$ es un operador 2-D Laplaciano (segunda derivada), que regula la variación del modelo de parámetros.

Con el empleo de la ecuación (5.44) se pueden resolver problemas en los que el número de parámetros del modelo es reducido (estratigrafía de pocas capas en los sondeos 1D); sin embargo, cuando estos aumentan como lo es el caso de los modelos 2D y 3D, la respuesta es inestable y errática en algunos casos (Constable et al. 1987). Debido a esto, se plantea una modificación como sigue:

$$(\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}+\lambda\,\mathbf{F})\;\Delta\mathbf{P}=\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{d}-\lambda\,\mathbf{F}\,\mathbf{P}_{\mathrm{i}} \qquad (5.45)$$

con $$\mathbf{F}=\alpha_{\mathrm{x}}\mathrm{C}_{\mathrm{x}}{}^{\mathrm{T}}\mathrm{C}_{\mathrm{x}}+\alpha_{\mathrm{y}}\mathrm{C}_{\mathrm{y}}{}^{\mathrm{T}}\mathrm{C}_{\mathrm{y}}+\alpha_{\mathrm{z}}\mathrm{C}_{\mathrm{z}}{}^{\mathrm{T}}\mathrm{C}_{\mathrm{z}}$$

en donde C_x, C_y, y C_z son las matrices del operador en las direcciones *x*, *y* y *z*. α_x, α_y *y* α_z son pesos relativos, asignados al filtro suavizador en las direcciones *x, y* y *z* ; $\mathrm{P_i}$ es el valor de los parámetros en la iteración anterior (Loke 2004). Esta modificación minimiza la variación espacial en el modelo de parámetros, de forma que la resistividad varía de forma gradual. (Loke et al. 2003; deGroot-Hedlin & Constable 1990; Ellis & Oldenburg 1994; Boonchaisuk et. al 2008).

5.5.3.2 Inversión Robusta. Norma L_1

La ecuación (5.45) es aplicable en aquellos medios geológicos en los cuales las propiedades eléctricas varían de forma suave y gradual (Loke et al. 2003).

En aquellos ámbitos en los que la geología tiene cambios abruptos, la norma L_2 no es aplicable, de ahí que se ha propuesto una modificación a la ecuación (5.45), en la que se minimizan los cambios absolutos de los valores de la resistividad (Claerbout & Muir 1973). La función objetiva en este caso es conocida como norma $\mathbf{L_1}$ definida por (también conocida como inversión Robusta o “Blocky”):

$$(\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}+\lambda\,\mathbf{F}_R)\;\Delta\mathbf{P}=\mathbf{A}^{T}\mathbf{R}_{\mathbf{d}}\;\Delta\mathbf{d}-\lambda\,\mathbf{F}_R\,\mathbf{P}_i \qquad (5.46)$$

en donde: $$\mathbf{F}_R = \alpha_x C_x^{\mathrm{T}} R_m C_x + \alpha_y C_y^{\mathrm{T}} R_m C_y + \alpha_z C_z^{T} R_m C_z$$

R_d y R_m son matrices ponderadas; de manera que los diferentes elementos de los vectores diferencias de los datos y el vector de "rugosidad" del modelo tengan igual peso en el proceso de inversión. En este caso la inversión asume que el subsuelo está constituido por regiones homogéneas, con una interfase bien definida entre estas (Olayinka & Yamaranci 2000). La norma $\mathbf{L_1}$, se utiliza para reducir el efecto de los datos con ruido, además permite incluir información acerca de la geología analizada (Loke 2003; Claerbout & Muir 1973; Ellis & Oldenburg 1994; Porsani et al. 2001; Scales & Gersztenkorn 1988; Olayinka & Yamaranci 2002).

5.6 Resistividad de las rocas estudiadas.

Para el análisis adecuado de las rocas constituyentes se hace referencia a las resistividades reportadas en la literatura y que se presentan en la Tabla # 5.2. En la práctica, observa que las rocas típicas de la región tienen un valor aproximado al que se reporta, algunas veces este puede variar hasta un orden de magnitud; sin embargo, es necesario observar que estas son zonas que son afectadas por un intenso intermperismo tanto químico como físico. Por tanto es poco probable que a profundidades como las estudiadas, la resistividad de una roca corresponda con las reportadas.

Tabla 5.2. Resistividades eléctricas de las rocas de referencia.

Tipo de Roca	**Rango de la resistividad Ω·m**
Suelos y Rocas sedimentarias	
Suelo (20 % arcillas)	33
Suelo superficial	250-1700
Suelo superficial (40 % arcillas)	33
Arcillas muy secas	50-150
Areniscas	1 a 7.4 10E8
Areniscas Cuaternarias	50-100
Aluvión y Areniscas	10 - 8 10E2
Calizas	(5 x10- 10 E7
Conglomerado	1000-10000
Gravas saturadas	100
Gravas secas	1400
Lutitas no consolidas	(8 - 50)
Lutitas consolidadas	20-2000
Margas	(3- 70)
Rocas volcánicas	
Basalto	10-1.3 10E7
Cuarzo dioritas (humedas)	2 10E4 - 2 10E6
Cuarzo dioritas (secas)	1.8 10E5
Andesitas (humedas)	4.5 10E4
Andesitas (secas)	1.7 10E2
Lavas	10 E2- 5 10 E4
Tobas (humedas)	2 10E3
Tobas (secas)	10 E5
* Fuente: Reynolds, 1997; Telford et all, 1994; Sharma, 1997.	

5.7 Principios de Equivalencia y Supresión.

En Geofísica Aplicada es bien conocida la diferencia entre lo que se conoce como problema directo y problema inverso. El problema directo consiste en el cálculo de la respuesta teórica de un modelo sintético. Es, por tanto, un ejercicio numérico que puede considerarse objetivo, ya que tiene solución única, es decir el resultado es el mismo independientemente de quien haga el cálculo, si está bien ejecutado. A cada modelo le corresponde una única respuesta o anomalía.

En cambio, el problema inverso consiste en determinar la estructura real del subsuelo a partir de los datos experimentales. En general, no tiene solución única ya que cada respuesta puede explicarse mediante diferentes modelos. Es también un ejercicio numérico que requiere un cierto control geológico, dado que

la elección de la hipótesis inicial es muy importante. Se trata de una interpretación y por esto tiene un indudable grado de subjetividad.

En prospección por métodos eléctricos resistivos, el problema inverso consiste en determinar los parámetros que definen el corte geoeléctrico (grosor y resistividad eléctrica de cada capa) a partir del ajuste por aproximaciones sucesivas de la respuesta del modelo con los datos experimentales. Sin embargo, estos modelos de ajuste no son únicos. Esto significa que cortes geológicos diferentes entre sí, pueden tener curvas de campo cuya diferencia mutua es menor al límite del error experimental, o sea que a cada curva le corresponderían diferentes soluciones de combinaciones de grosores y resistividades de las capas del modelo (Kirsch 2006).

El término equivalencia, definido originalmente por Maillet (1947) se utiliza para describir el fenómeno por el cual modelos con apreciables diferencias en los parámetros de sus capas pueden generar curvas de resistividad eléctrica que no se distinguen dentro de la precisión de las medidas (Koefoed 1979).

Por ello, es necesario seleccionar entre todas las soluciones posibles aquella que, además de presentar un ajuste adecuado con los datos de campo, tenga sentido en el contexto geológico de la zona en estudio. Para ello se requiere contar con información a priori que limite las variaciones en el modelo de ajuste. Esta información permite reducir la ambigüedad que suele darse en general en los todos los métodos geofísicos que derivan de un campo potencial y en particular en el método geoeléctrico (Christensen 2000).

En nuestro caso, teniendo en cuenta estas consideraciones, cuando no se disponía de información “a priori” se ha seguido el criterio de interpretar en primer lugar los datos de resistividad aparente sin tener en cuenta los posibles problemas de equivalencia, dejando para una fase posterior la correlación o coherencia con los modelos obtenidos de los sondeos o perfiles de resistividad contiguos.

5.8 Parámetros de Dar Zarrouk.

Los parámetros de Dar Zarrouk fueron introducidos por Maillet (1947), para explicar el problema de la no-unicidad en la interpretación de los datos de resistividad. Estos parámetros consisten de dos variables que pueden ser asignadas a cada capa horizontal de un modelo estratificado de capas y se definen como:

la resistencia transversal, dada por T (Ωm^2),

$$T = \rho \cdot h \qquad (5.47)$$

y la conductancia longitudinal dada por S ((Ωm),

$$S = h/\rho \qquad (5.48)$$

en donde ρ y h son la resistividad y el espesor de cada capa del estrato.

La resistencia transversal es el parámetro dominante cuando la corriente tiende a fluir perpendicular a las capas en los estratos, tal es el caso de las curvas tipo K. En el caso en el que la corriente fluye paralela a los estratos, como en las curvas tipo H, la conductancia longitudinal es el parámetro dominante (MacDonald et al. 1999).

En el caso de los sondeos verticales 1-D, se ha podido resolver el problema de la equivalencia mediante la solución a los parámetros de Dar Zarrouk. En el caso en el que la resistencia transversal (T = ρh), de una capa es mucho menor que la del conjunto de capas conductoras adyacentes, la misma puede ser sustituida por otra de resistividad (ρ) y espesor (h) diferente, siempre que se conserve el valor de T, de esta manera no se afecta el ajuste de la capa en la interpretación por lo que la curva de resistividad aparente no varía significativamente. En el caso de que la conductancia longitudinal S = h/ ρ sea mucho menor que la del conjunto de capas resistivas adyacentes, la capa en cuestión puede ser sustituida por otra que mantenga una misma relación de S (Bhattacharya & Patra, 1968; Koefoed, 1979; Reynolds, 1997; Sharma, 1997).

En la Figura 5.14 se muestra un caso de equivalencia en T correspondiente a un corte geoeléctrico de tres capas tipo K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$) en el que la S de la primera capa ($S_1 = E_1/ \rho_1 = 0'15$) es mucho mayor que la de segunda ($S_2 = E_2/ \rho_2 = 0'0033$). En este caso puede multiplicarse el grosor y dividirse la resistividad de la

segunda capa por un mismo número pequeño (generalmente < 2) de forma que el valor de T se mantiene invariable, mientras que el valor de S_2 de dicha capa se modifica un factor igual a dicho número elevado al cuadrado, pero como S_2 es significativamente menor que S_1.el valor global de S (suma de S_1 más S_2) queda poco afectado por la modificación. Es decir que pueden generarse un número infinito de curvas muy similares con diferentes valores de la 2ª capa, siempre que el producto $\rho \cdot E$ sea constante, como se aprecia en la Figura 5.14.

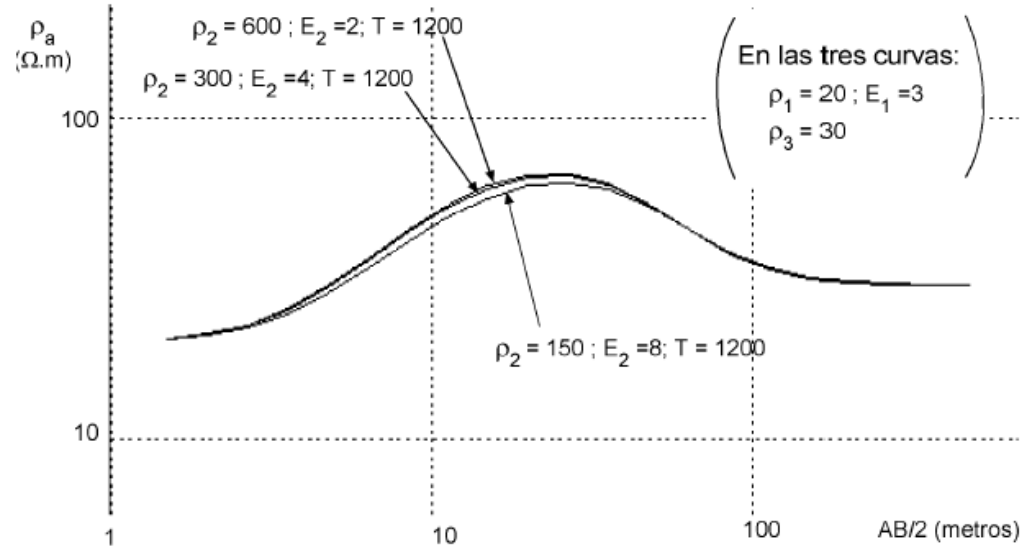


Figura 5.14. Ejemplo de curvas equivalentes para un modelo de tipo K (Tomado de Orellana 1982).

Además del principio de equivalencia, la interpretación de las curvas de resistividad aparente presentan otro problema de ambigüedad que se define como principio de supresión, según el cual una capa delgada de resistividad intermedia entre las adyacentes (tipo Q ó A) puede pasar desapercibida en la interpretación tal como lo es el caso de la presentado en la Figura 5.15.

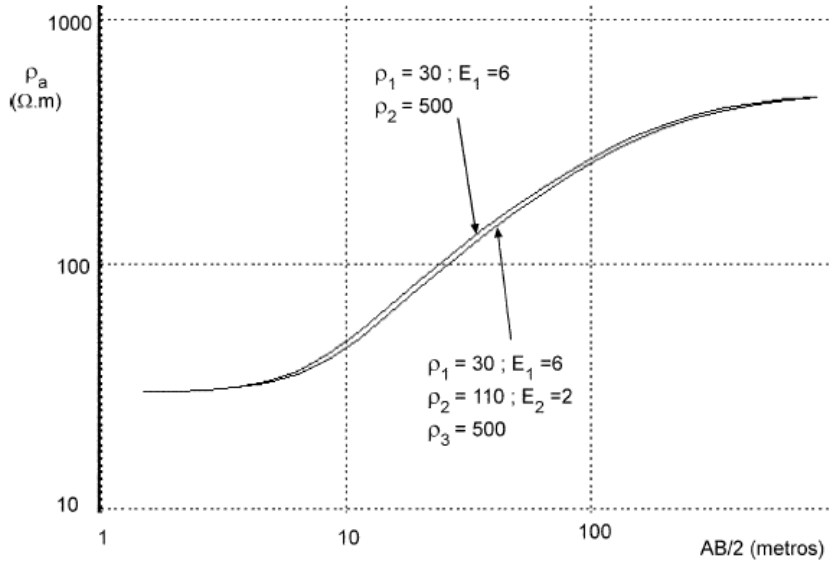


Figura 5.15. Ejemplo de supresión de una capa en una curva de tipo A (Tomado de Orellana, 1982).

En el caso, de las mediciones en 2D, el análisis es más complejo ya que incorpora la información de muchos puntos alrededor de una zona determinada. Esto ocurre sobretodo si se considera que varios modelos en 2-D pueden ajustar el mismo conjunto de medidas realizadas sobre el terreno, esto es así debido a las limitaciones que plantea la equivalencia. Por ello, al ajustar los datos de campo se requiere la introducción de información a priori basada en información geofísica y geológica obtenida en la zona de estudio. Esta información requiere entonces establecer un modelo inicial con datos obtenidos de manera independiente. Si el primer modelo ha incorporado toda la información disponible como limitantes, generalmente es posible calcular una respuesta que no sólo se ajusta los datos de campo, sino que también se aproxima a la geología del subsuelo. Esto es posible siempre que, la inversión permita introducir manualmente los cambios en los parámetros del modelo; lo cual se hacen por ensayo y error hasta que se logre un ajuste adecuado entre los datos medidos y los sintéticos (Olayinka & Weller 1997). Hoffmann & Dietrich (2004), plantean una alternativa resolviendo la ambigüedad partir de los modelos de equivalencia en sondeos 1-D, obtenidos a partir de las tomografía eléctricas y discuten el hecho de que los algoritmos comerciales no evalúan el problema de la equivalencia, para fiabilidad de los resultados.

5.9 Resultados

La complejidad geológica, así como la discontinuidad entre sus elementos constitutivos, propone como estrategia de análisis, interpretar de forma separada, los resultados obtenidos en cada uno de los sectores estudiados.

Para no desatender el enfoque metodológico, esta estrategia, requiere un examen integrador que permita llegar a conclusiones objetivas de la aplicación. Por ello, esta sección se desarrolla con la aplicación de los modelos interpretativos de algunas tomografías, mediante el calculo del modelo directo. Para ello se emplea el programa RES2DMOD© (Loke 2004) y en la inversión se analiza la respuesta de los dispositivos, mediante el RES2DINV© (Loke 2004). En este último, se analiza el resultado de las rutinas de inversión, basadas en los mínimos cuadrados $\mathbf{L_2}$ y $\mathbf{L_1}$ (Smoothness Constrained y Robusta respectivamente), ya discutidas.

La modelación es un recurso que permite ensayar los métodos de interpretación con parámetros controlados. De otra manera seria imposible, tener un conocimiento de las estructuras del subsuelo en medios geológicos naturales (Dahlin & Loke 1998; Martorana et al. 2009).

5.9.1 Sondeos geoeléctricos del Sector de San José.

En el sector de San José se realizaron 22 tomografías (ERT por sus siglas en inglés). En estas se aplicaron varios dispositivos, tomando en consideración la distribución del terreno y el tipo de geología.

En el área también se realizaron dos sondeos eléctricos verticales (SEV). La distribución de las tomografías y SEV´s realizadas en este sector se presenta en el mapa de la figura 5.16.

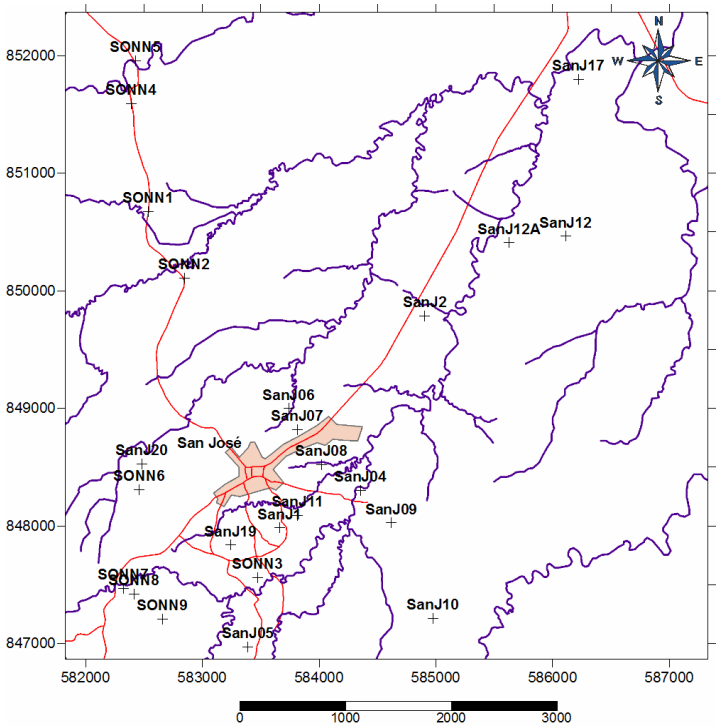
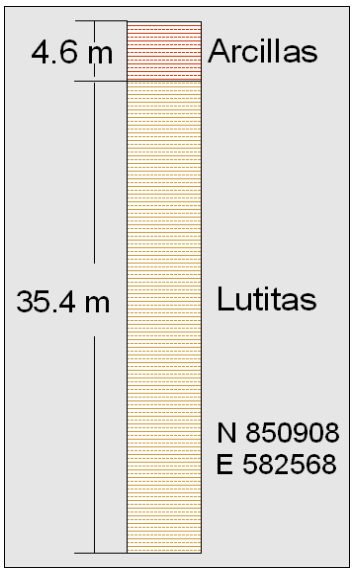


Figura 5.16. Localización de los sondeos geoeléctricos del sector de San José.

5.9.1.1 Tomografía SONN1.

Esta se realizó sobre una planicie suavemente ondulada, constituida por sedimentos no consolidados de arcillas y lutitas. En algunas perforaciones y afloramientos del área se han encontrado capas de areniscas y calizas alternadas, no consolidadas. Justo en la zona central de la tomografía se realizó una perforación de prueba, la cual se ilustra en la figura 5.17. Próximo a la zona central y perpendicular, se aprecia un drenaje que durante la época de lluvia actúa como cauce de la escorrentía superficial.

Para el análisis de la Tomografía SONN1, se diseñó un modelo sintético, cuyas resistividades son 5, 10 y 40 Ω·m respectivamente. A las resistividades se le agrego un ruido aleatorio de 3%, común en estas experiencias (Seaton & Burbey 2002, Martorana et al. 2009). La inversión de los datos de campo es comparada con los resultados obtenidos a partir del modelo con el dispositivo Wenner, los que se ilustran en la figura 5.18.



a

b

c).

Figura 5.17. a). Estratigrafía del pozo
b). Perforadora de percusión en el centro de la tomografía SONN1
c). Alineación del drenaje en la zona media de la tomografía.

En el ajuste por inversión del modelo sintético, empleando “smoothness constrained”; se observa que, a los 80 metros, en donde existe un máximo resistivo, la variación de la resistividad es gradual y en este caso se sobreestima el valor del modelo empleado (66 Ω·m).

Por otro lado, el método de ajuste ensancha la estructura de forma horizontal. En la inversión de los datos de campo, la resistividad de la zona varía de forma gradual, pero se observa que la resistividad de la zona resistiva está subestimada, considerando que el valor de esta zona es aproximadamente 40 Ω·m. Además, la zona se ensancha demasiado, asignando valores inexistentes en profundidad.

En el modelo SONN1, empleando inversión robusta, los límites de la zona resistiva están más definidos (parte (c) de la figura 5.18). El valor de la resistividad del modelo invertido es de 49,5 Ω·m y se aproxima al valor propuesto de 40 Ω·m. En el resto de la tomografía la respuesta es casi homogénea, con valores que van de 5 a 10 Ω·m.

En la interpretación de los datos de campo de la tomografía SONN1 (parte (d) de la figura 5.18). Se observan los límites definidos y el máximo resistivo está en 39 Ω·m, lo cual es un indicio de la fortaleza del método para interpretar las estructuras investigadas.

A partir de la perforación realizada en el sitio, se confirma que la zona tiene un alto contenido de lutita (≈ 5 Ω·m) y el drenaje estaría constituido por un material de naturaleza lutitica, desagregado y mezclado con material de arrastre de la zona próxima al pie de monte. Esta metodología se aplicó con los dispositivos Wenner, Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo, este último se aplicó para comparación.

De acuerdo a la perforación, la tomografía SONN1, representa una capa de lutita con más de 30 metros de espesor en la zona central del dispositivo.

Con el dispositivo Wenner-Schlumberger (figura 5.19), la respuesta de inversión del modelo sintético es similar a la obtenida con el Wenner. Utilizando el método *smoothness constrained,* el análisis indica que el área más resistiva se dilata horizontalmente, la resistividad se sobreestima (64.2 Ω·m). La variación de la resistividad es gradual, lo se muestra en la parte (a) de dicha figura. En la tomografía SONN1, parte (b) de la figura, se observa que la zona resistiva tiene las mismas características que el modelo sintético, sin embargo el valor máximo de la resistividad es de 30 Ω·m, por debajo de los 40 Ω·m asumidos.

El modelo sintético, interpretado mediante la inversión robusta, parte (c) de la figura 5.19, indica que la resistividad está distribuida de forma más coherente con los datos geológicos.

Los datos proporcionan un valor de 49 Ω·m, cercano al asumido de 40 Ω·m. En el caso de la tomografía SONN1, parte (d) de la figura 5.19, el valor central de la zona resistiva es de 45 Ω·m.

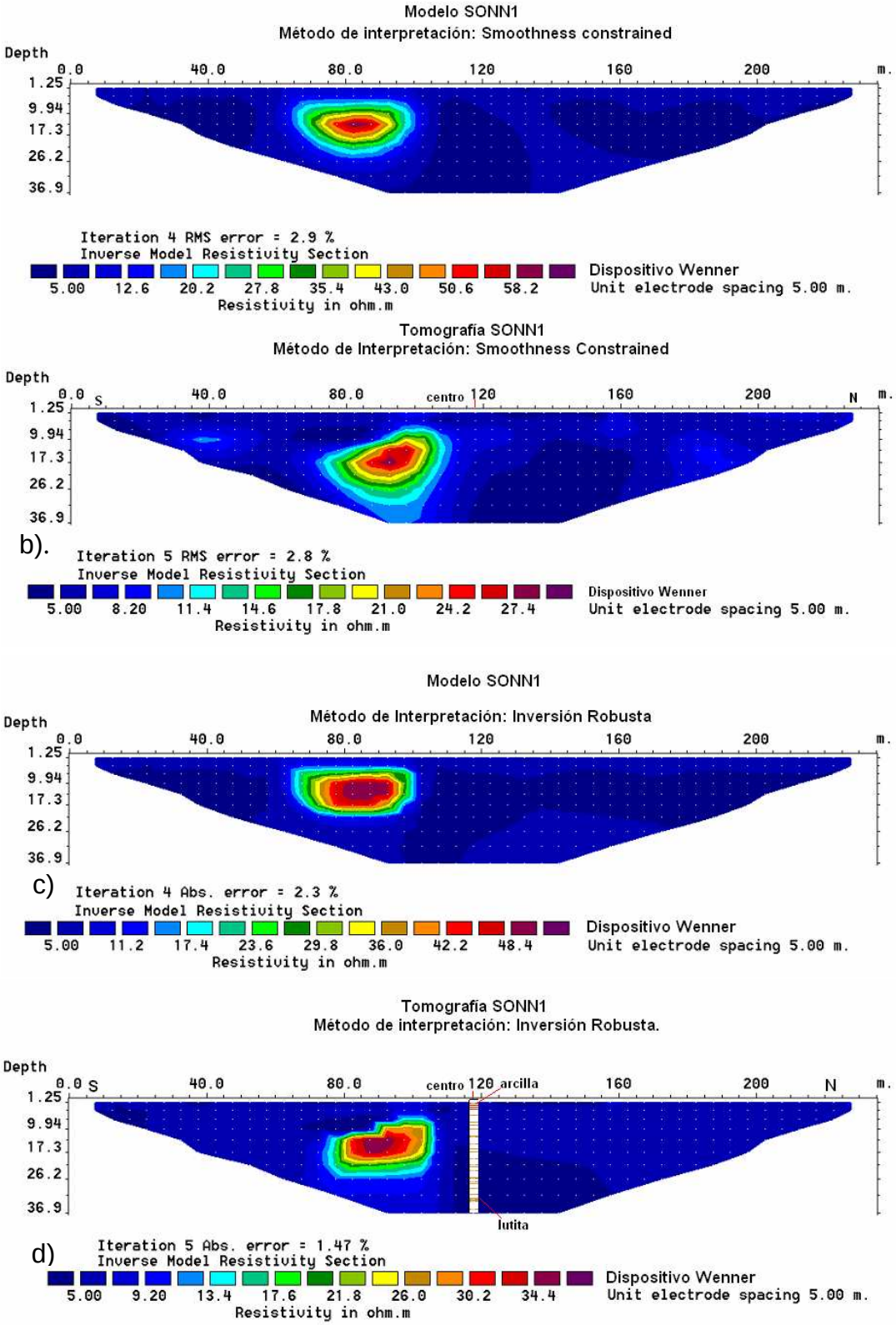


Figura 5.18. Comparación de los métodos de inversión del modelo sintético y de los datos de campo de la tomografía SONN1, con el dispositivo Wenner. a). modelo sintético ajustado por smoothness constrained. b). datos de campo por smoothness constrained. c). modelo sintético mediante inversión robusta. d) datos de campo ajustados mediante inversión robusta.

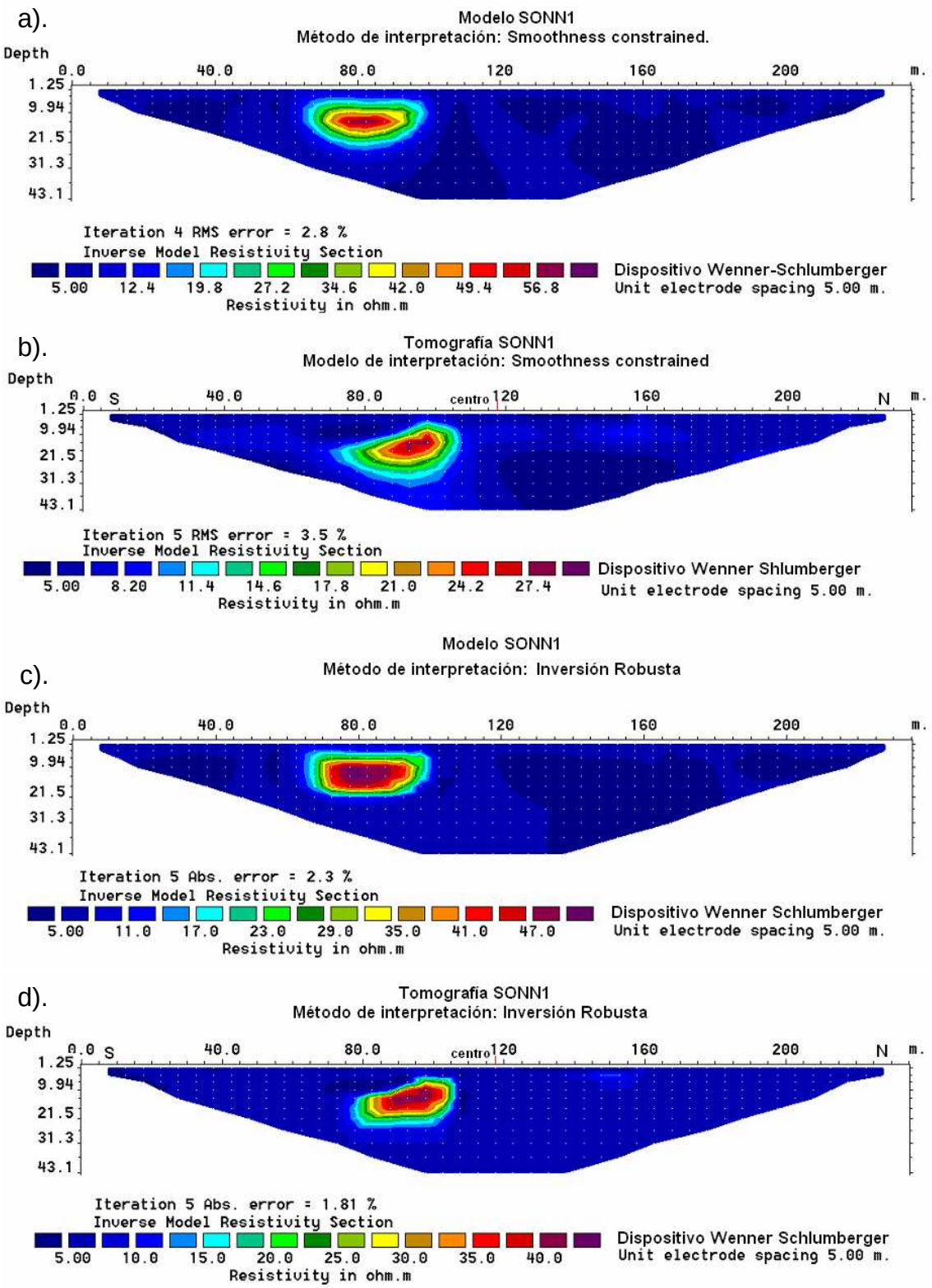


Figura 5.19 Comparación de los métodos de inversión del modelo sintético y de los datos de campo de la tomografía SONN1, mediante el dispositivo Wenner-Schlumberger. a). modelo sintético ajustado por smoothness constrained. b). datos de campo por smoothness constrained. c). modelo sintético mediante inversión robusta. d) datos de campo ajustados mediante inversión robusta.

La figura 5.20, muestra un ensayo con el dispositivo Dipolo-Dipolo. Los resultados obtenidos en el modelo sintético y en la tomografía SONN1 realizada en el sitio, no son confiables y no se pueden comparar como en los otros dispositivos empleados. La zona resistiva en el caso de la tomografía está unos 10 metros desplazada a la derecha y en las dos metodologías aparece un alto resistivo de forma bilobular. La sensibilidad en este dispositivo juega un papel fundamental, de ahí que solo se aplicó esta metodología a manera de ensayo.

El modelo sintético y los resultados de la tomografía SONN1, son indicativos de que la inversión de los datos debe realizarse mediante el empleo del método de inversión robusta (norma $\mathbf{L_1}$). De los dispositivos empleados los más adecuados para el estudio son el Wenner y el Wenner-Schlumberger. De ahí que en lo sucesivo, a menos que se indique, se empleará esta metodología de abordaje del problema.

5.9.1.2 Tomografía SONN2

Esta se realizó sobre una planicie, tomando como centro un cauce en el cual afloran fragmentos de roca alterada en el cauce y a los costados un paquete de lutita y areniscas no consolidas. Esta tomografía, se realizó para determinar el espesor del aluvión en el drenaje y posibles paleo-cauces. En la foto de la figura 5.21, se aprecia el sitio de la disposición de los electrodos.

Los dispositivos empleados son el Wenner y el Wenner-Schlumberger, y los resultados se muestran en los gráficos de la figura 5.22.

En el dispositivo Wenner, parte a) se observa que la resistividad eléctrica, como va a ocurrir a lo largo de todo el estudio, presenta valores muy bajos (5 a 18 Ω·m), lo cual es común en zonas tropicales. Las zonas lutiticas con un valor de 5 Ω·m y las zonas con mayor valor de resistividad, estarían representado el cauce de la quebrada y posiblemente paleo-cauces.

Estos resultados son más visibles en el caso de la tomografía mediante el dispositivo Wenner-Schlumberger, parte b). Las diferencias en este caso, se deben al método de interpolación en la confección de la imagen y no con la aplicación del dispositivo. Pero si es claro el hecho de que una combinación de dispositivos puede eliminar cualquier ambigüedad en la interpretación.

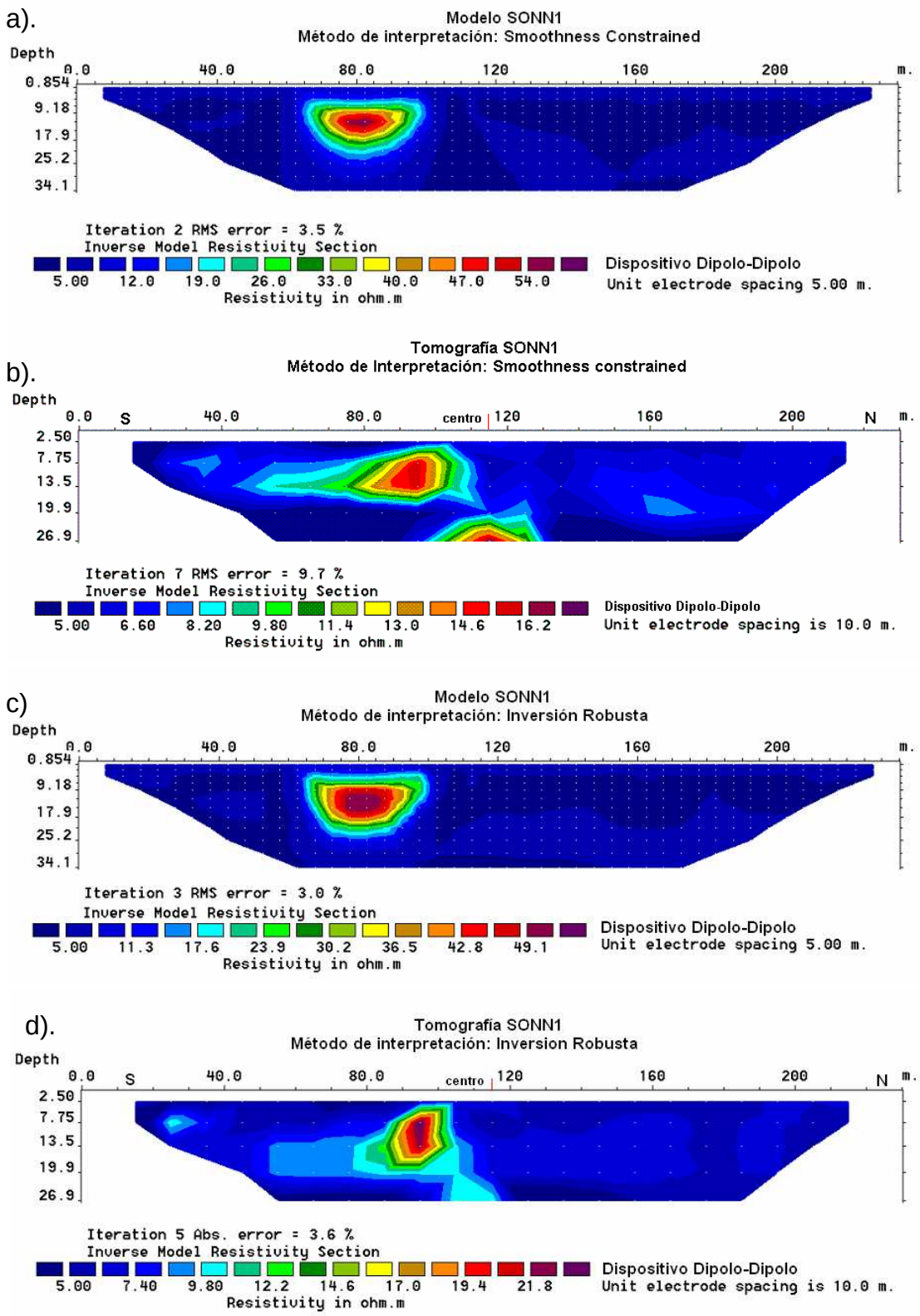
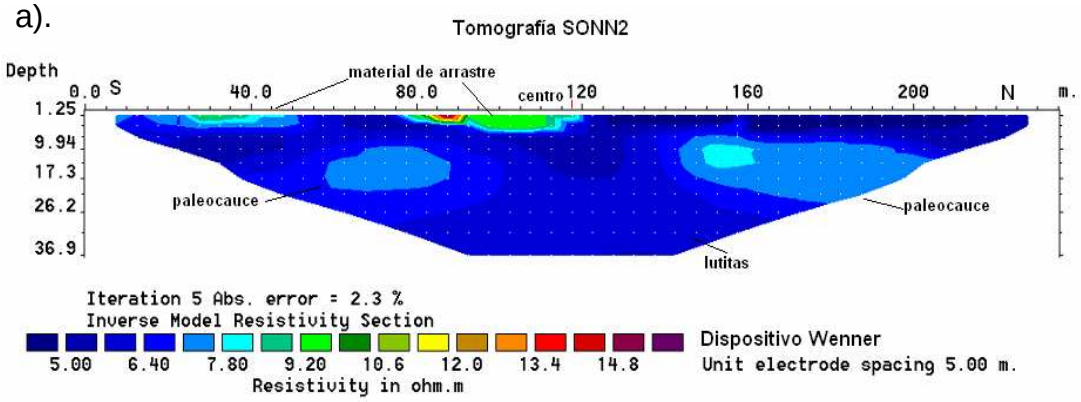


Figura 5.20. Comparación de los métodos de inversión del modelo sintético y de los datos de campo de la tomografía SONN1, mediante el dispositivo Dipolo-Dipolo. a). modelo sintético ajustado por smoothness constrained. b). datos de campo por smoothness constrained. c). modelo sintético mediante inversión robusta. d) datos de campo ajustados mediante inversión robusta.

Figura 5.21 Emplazamiento de la tomografía SONN2.

a).



b).

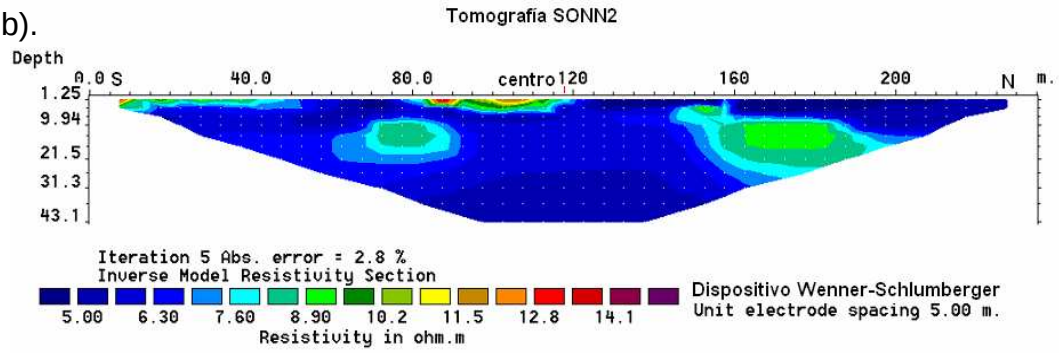


Figura 5.22. Inversión de datos de la Tomografía SONN2. a). Dispositivo Wenner, b). Wenner-Schlumberger.

5.9.1.3 Tomografía SONN3

Esta tomografía se realizó en una zona de fracturas, con un relieve ondulado, en el que las aguas de escorrentía drenan hacia la Quebrada Mariana.

En el área se aprecian fragmentos de rocas aglomeráticas y horizontes arcillosos. En la figura 5.23, se aprecia la orientación de los dispositivos empleados.

Figura 5.23. Alineamiento de la tomografía SONN3, al fondo se observa el bosque de galería de la Quebrada Mariana.

Esta es una zona de contacto entre la roca volcánica y los estratos lutito-arenosos, que se localizan al otro lado de la quebrada. Los datos invertidos se aprecian en la figura 5.24. En esta se han representado los resultados de los dispositivos Wenner, Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo.

En el dispositivo Wenner (a), hacia la zona central, se aprecian las zonas más resistivas, con un valor de 32-34 Ω·m. Esta respuesta representa a los aglomerados alterados los cuales afloran de forma fragmentada en el área. Luego, se aprecia la respuesta de las arcillas con valores de 5-8 Ω·m.

La superficie de la zona más resistiva puede considerarse un reservorio por las características encajantes de la roca de este sector. Al comparar estos resultados con los obtenidos en los otros dispositivos Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo, se percibe una similitud en la distribución de la resistividad (en la figura 5.24 b y c respectivamente).

Esta claro que el dispositivo Dipolo-Dipolo, no alcanza la profundidad de exploración de los otros dos. Por otro lado, al realizar la inversión de los datos con el RES2DINV© (Loke, 2004), tomando en consideración la topografía del

terreno, se obtiene la distribución de la resistividad en forma real, lo que de otra forma sería más complejo para interpretar (Fox et al., 1980).

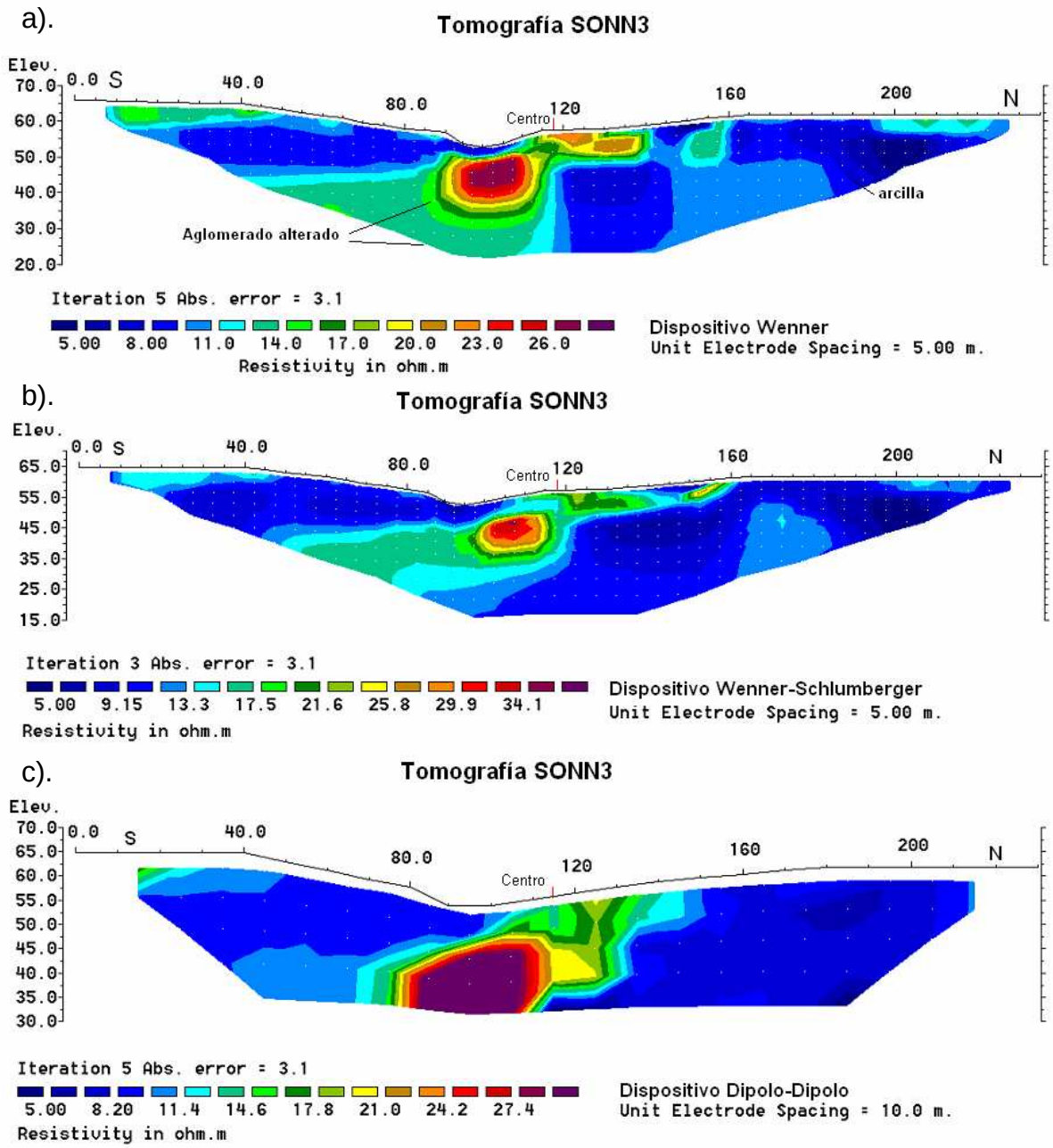


Figura 5.24. Inversión de datos de la Tomografía SONN3. a). Dispositivo Wenner, b). Wenner-Schlumberger, c). Dispositivo Dipolo-Dipolo.

5.9.1.4 Tomografía SONN4

Esta tomografía se realizó sobre la terraza del margen derecho del Río Mensabé la cual está constituida por material de arrastre no consolidado. Este

consiste en cantos rodados, areniscas, lutitas y fragmentos angulosos; que representan diferentes eventos en la evolución del río.

En esta zona, se espera encontrar una capa de material suficientemente protegida y con características para transmitir las aguas subterráneas.

En este sector se aplicó el dispositivo Wenner y el resultado de la inversión se presenta en la figura 5.25. De acuerdo a éste, la geología del subsuelo esta distribuida de forma irregular. Esto significa que al realizar una perforación deberá hacerse justo en las zonas en las que la resistividad marca un contraste alto.

En esta tomografía, los valores de resistividad de las lutitas están entre 5 y 7 Ω·m, las areniscas lutiticas entre 8 y 10 Ω·m y los conglomerados arcillosos entre 10 y 14 Ω·m.

Es importante resaltar que la lutita siempre esta presente en todas estas capas como material de relleno. En la figura 5.26 se aprecia la terraza en discusión.

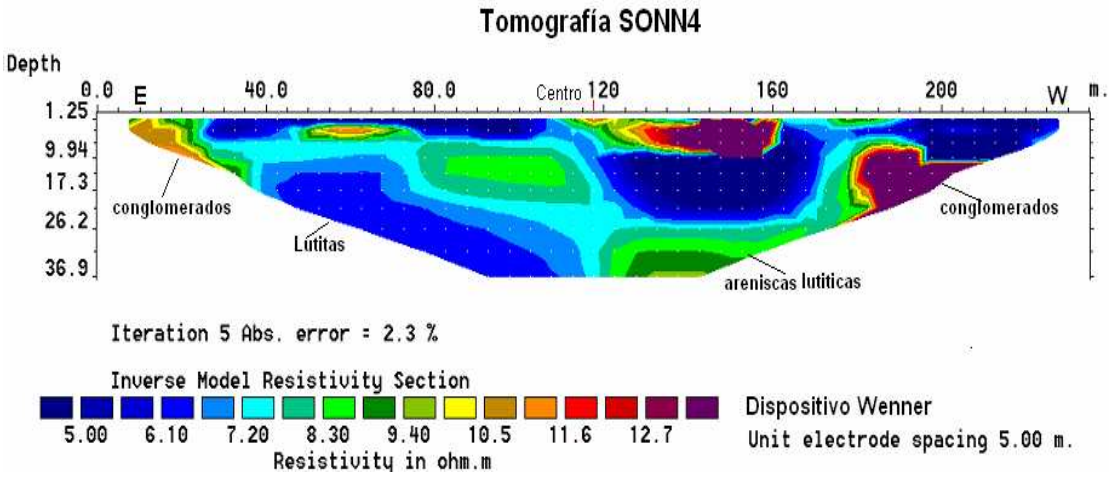


Figura 5.25. Inversión de datos de la Tomografía SONN4.

Figura 5.26. Terraza en la margen derecha del Río Mensabé. Al Fondo se aprecia el bosque galería de dicho río.

5.9.1.5 Tomografía SONN5

Esta tomografía se realizó en la margen izquierda del Río Mensabé y es contigua a la zona de la SONN4. Este sector, también esta constituido por una terraza aluvial y en la misma hay evidencias de que el río ha variado su curso; de ahí, la posibilidad de detectar paleocanales. En la Figura 5.27, se presenta, de forma panorámica, una visión del sector estudiado.

Figura 5.27. En la imagen se aprecia la disposición de los electrodos de la Tomografía SONN5. La línea de trazos indica la dirección del perfil; hacia el final (fondo) el cauce del río.

En la Figura 5.28, se presenta la inversión de los datos de la tomografía SONN5. En esta, la resistividad de las lutitas es de 5 a 6.6 Ωm; existen amplias

zonas hacia el centro de la tomografía, cuyo valor es superior a 10 Ωm, las que podrían representar la respuesta geoeléctrica de un paleocauce.

Casi toda la parte superficial de la zona estudiada está cubierta de arcilla. Esto es un indicativo de que el acuífero están impermeabilizado, en su parte superior, por una capa de aproximadamente un metro de espesor.

Es de destacar que en esta zona, los constituyentes tienen en mayor o menor grado la presencia de lutitas, tampoco se puede descartar la presencia de agua lo que, en ambos casos, reduce la resistividad en estos cauces.

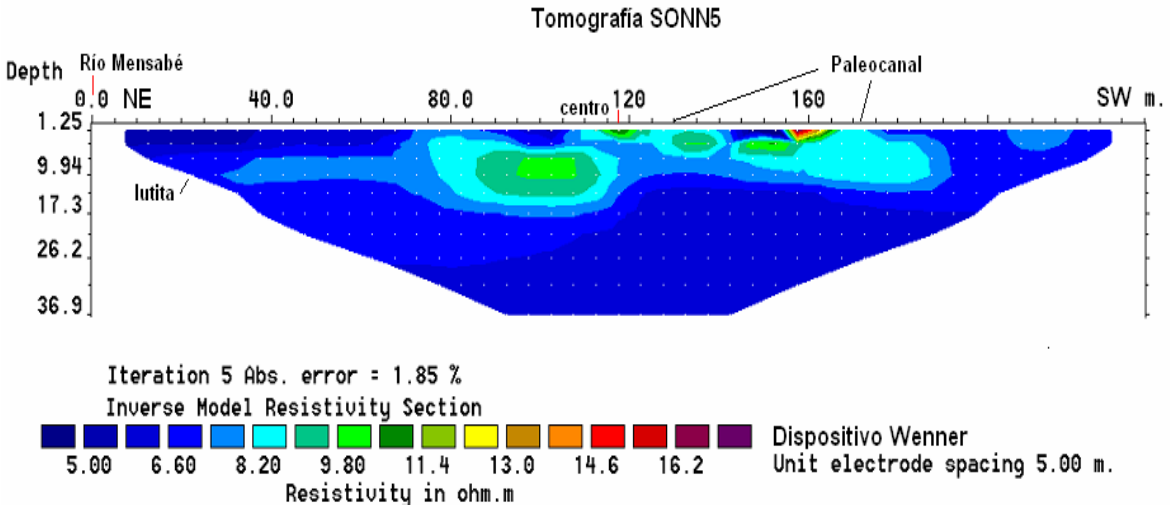


Figura 5.28. Inversión de datos de la Tomografía SONN5. Obsérvese la distribución de los paleocanales en la zona media.

En la Foto # 5.29, se ilustra una imagen de la potencia que pueden tener las terrazas próximas al Río Mensabé.

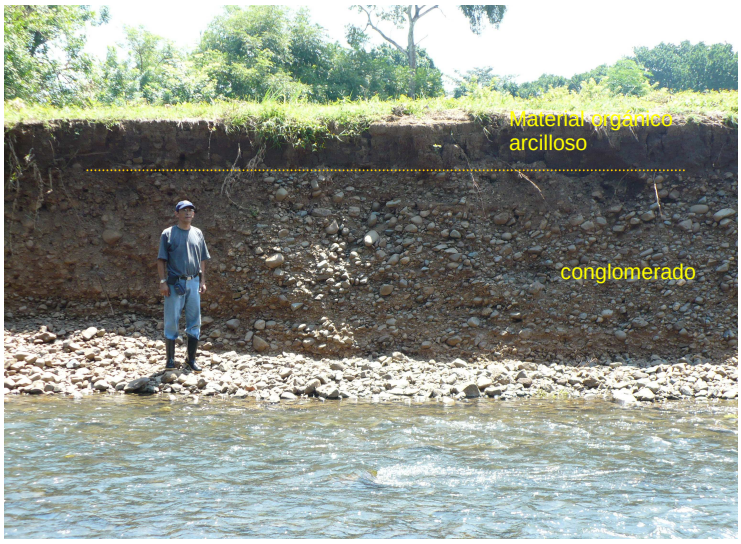


Figura 5.29. Terraza aluvial en la margen Izquierda del Río Mensabé. Obsérvese los cantos rodados de tamaño diverso y la presencia de material orgánico y arcilloso en la parte superior.

5.9.1.6 Tomografía SONN6

Esta tomografía se realizó en la zona SW de San José, en las proximidades de la cantera homónima. El terreno esta muy fracturado y se observan bloques de roca volcánica no diferenciada en donde afloran rocas calizas alteradas. El perfil de tomografía eléctrica se dispuso perpendicular a las estructuras. Estas últimas, están alineadas con la falla de San José y rellenas con material de derrubio. En la Figura 5.30, se ilustra la disposición de los electrodos, para los dispositivos Wenner y Wenner-Schlumberger. La zona estudiada, se caracteriza por tener un fuerte drenaje durante la época lluviosa. Ello permite acumular, en algunos sectores, importantes volúmenes de agua superficial, la cual es utilizada para el ganado durante la época seca.

Los propietarios de estos terrenos, también han realizado perforaciones, de forma particular, sin embargo no se han logrado registros estratigráficos o de caudales.

Figura 5.30. Vista parcial del sector de la tomografía SONN6. En la zona central se aprecia el drenaje predominante, cubierto por arcillas y bloques de roca caliza y volcánica.

En la figura 5.31, se presenta la inversión de los datos obtenidos con los dispositivos Wenner y Wenner-Schlumberger, el espaciamiento mínimo entre

electrodos es de 5 metros. Hacia el oeste (W), en los primeros horizontes geoeléctricos, a la profundidad de 14 m, se observa la respuesta de las lutitas con una resistividad de 5 a 7 Ω·m. Hacia el este (E), se observa que el material de derrubio o de relleno, cubre la profundidad explorada, en ambos dispositivos, la resistividad de este material varía de 7 a 14 Ω·m. Luego, en la zona de contacto, hacia el centro de la tomografía, se observa la respuesta de las calizas alteradas e inclinadas de acuerdo a una dirección preferencial. La resistividad de estas calizas alteradas varía de 14 a 20 Ω·m. Con el dispositivo Wenner-Schlumberger los resultados son similares.

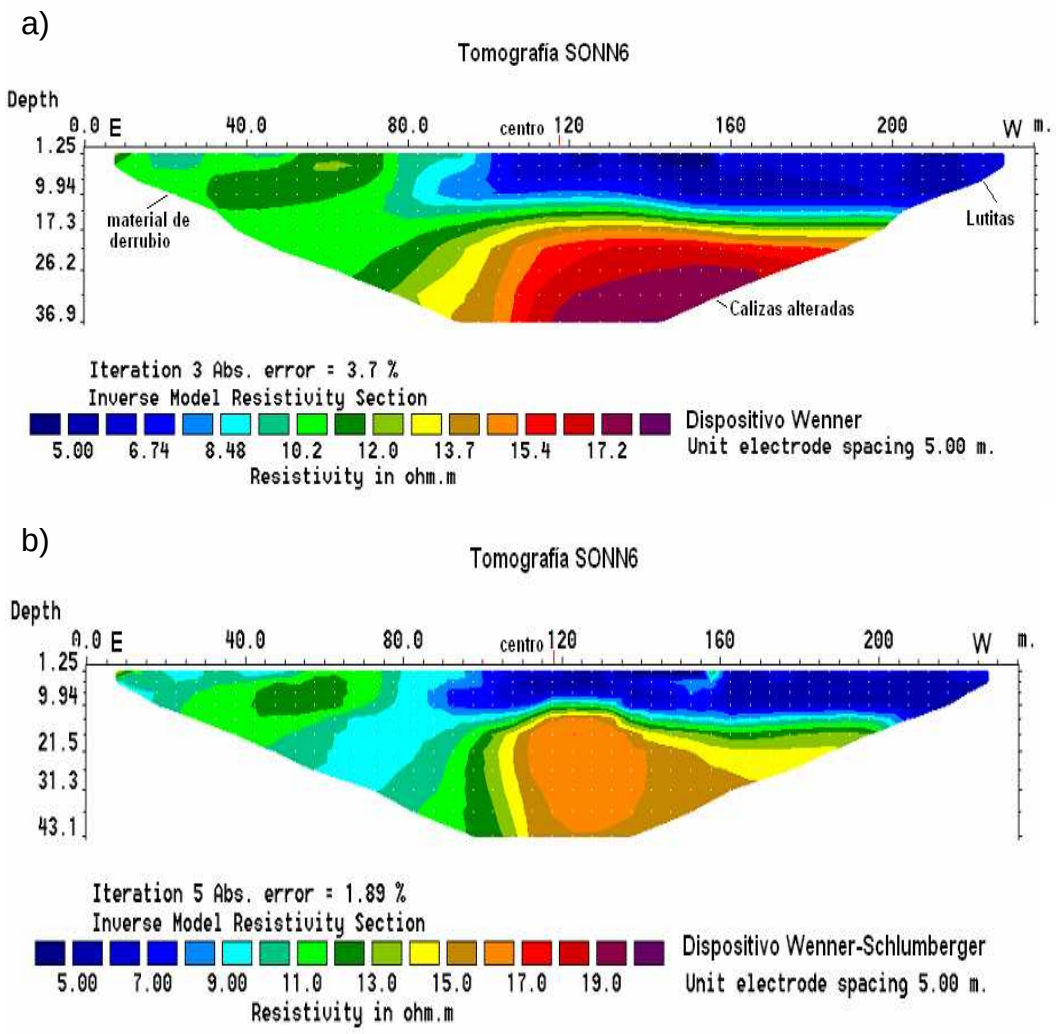


Figura 5. 31. Inversión de los datos de la tomografía SONN6. a) Dispositivo Wenner, b) dispositivo Wenner-Schlumberger.

5.9.1.7 Tomografía SONN7

Esta tomografía se realizó perpendicular al contacto entre las formaciones Playa Venado y Macaracas. En el sitio están en contacto, en su orden, aglomerados andesíticos, calizas y lutitas. Las calizas cabalgan sobre el aglomerado andesítico en la parte media del cerro Evangelisto. Luego, en el altiplano de San José, estas se inclinan por debajo de las lutitas y probablemente en contacto con las andesitas de la formación Playa Venado, debajo de este paquete lutítico.

En el área se observan derrubios de las laderas del cerro. En la figura 5.32, se muestra una imagen de la zona de estudio. La tomografía se realizó con el dispositivo Wenner, con una separación mínima entre electrodos de 5 metros.

Para el estudio de esta tomografía se empleo un modelo sintético. La inversión de los datos de este modelo se muestra en la figura 5.33. Al modelo se le asignaron resistividades para la zona más resistiva, la media y la baja de 75, 35 y 5 Ω·m, respectivamente. En la figura 5.33, también se presenta la inversión de los datos de campo mediante la norma L_1.

Figura 5.32. Ilustración del contacto entre las calizas de San José y las lutitas, en la zona de drenaje se observa un afloramiento de las primeras. En línea punteada el alineamiento de la tomografía SONN7.

La inversión de datos indica que las calizas alteradas, se encuentran por debajo de los 10 metros, más allá del centro de la tomografía, en dirección NE, sin embargo hacia el SW estas se encuentran a muy poca profundidad, escasos 5

metros. En profundidad, como se puede apreciar, las calizas son más resistivas (158 Ωm), esto es indicativo de que el grado de compactación de estas puede aumentar con la profundidad. Todo el sector NE esta cubierto por un paquete de material lutítico y de derrubio alterado cuya resistividad se encuentra entre 5 y 24 Ωm. Si se intenta realizar una perforación de exploración en este sector, lo conveniente sería realizarla próxima a la zona de contacto con las calizas alteradas, en donde estén más someras. La diferencia entre la inversión del modelo numérico y la de los datos de campo, se debe a que no se toma en consideración el efecto topográfico en el primero.

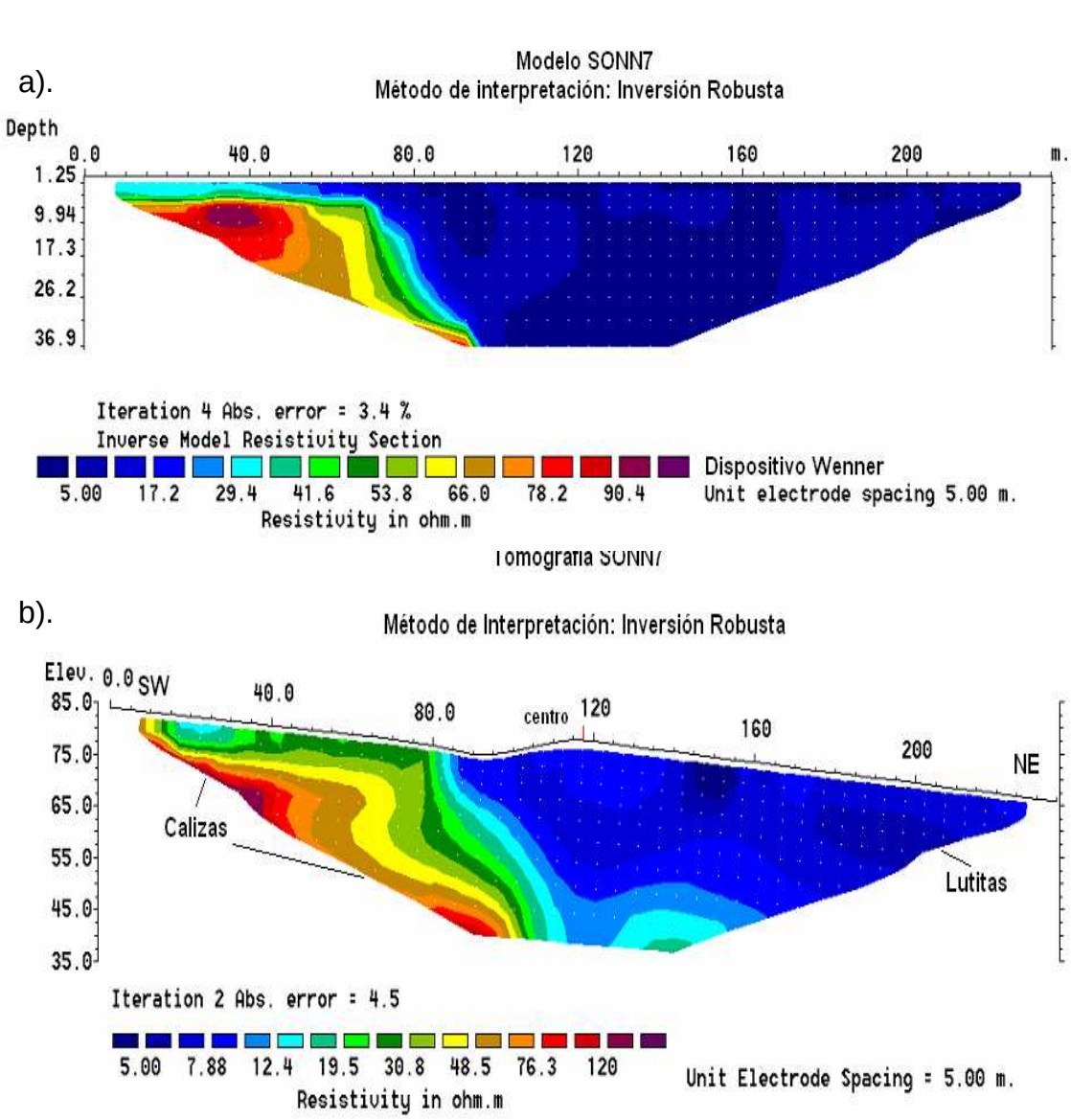


Figura 5.33. a). Inversión del modelo sintético de la tomografía SONN7. b) Inversión de los datos de la tomografía tomando en consideración el efecto topográfico.

5.9.1.8 Tomografía SONN8

Esta tomografía se realizó perpendicular al lecho de la Quebrada La Cruz, en la que afloran las calizas; en esta se observan derrubios y material rocoso alterado no clasificado. En esta quebrada, durante el periodo seco, las aguas se infiltran a través de las grietas y fracturas de las calizas, para luego aparecer quebrada abajo en las proximidades de la Quebrada Mariana. Esta quebrada se encuentra a unos 10-15 metros por debajo del nivel de la Tomografía SONN7. En la figura 5.34, se ilustra la posición del centro del dispositivo empleado.

La tomografía SONN8 se realizó con el dispositivo Wenner y la inversión de los datos obtenidos se muestra en la figura 5.35.

Figura 5.34. Quebrada La cruz sobre el lecho de rocas calizas. En la zona central se aprecia la dirección de la tomografía SONN8.

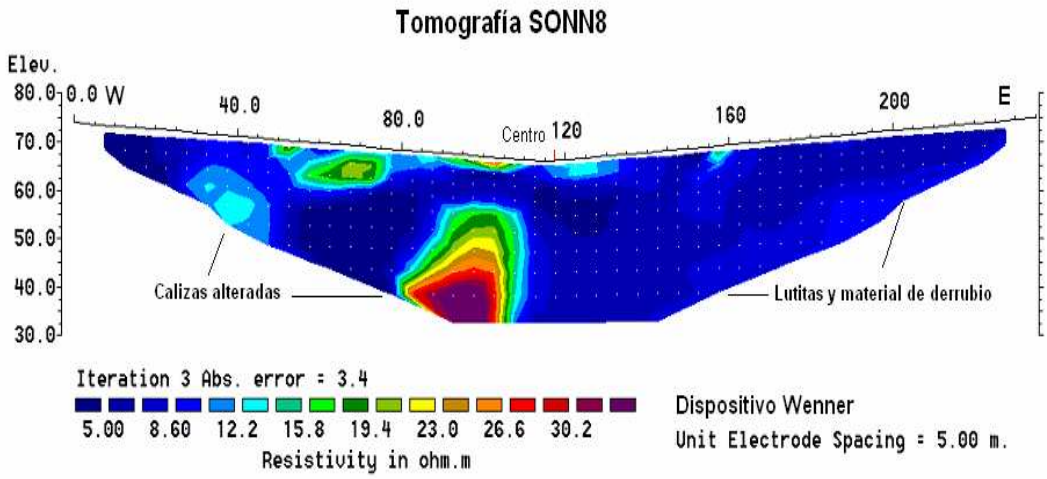


Figura 5.35. Inversión de datos de la tomografía SONN8, nótese el alto resistivo de la zona de la Quebrada La Cruz.

Esta tomografía muestra que la zona de las calizas está cubierta en gran parte por las lutitas y el material de derrubio alterado (5-10 Ω·m).

En la zona central, correspondiente al lecho de la quebrada, se observa un alto resistivo (23-35 Ω·m), que alcanza una profundidad de 30 metros. Esto podría ser un indicio de que la zona podría estar saturada en agua, lo que trae como consecuencia una disminución en la resistividad.

La zona circundante a la quebrada, compuesta en parte por lutitas (5-10 Ω·m), tiene estratos de calizas, sin embargo la respuesta geoeléctrica, de estos, puede estar afectada por el relleno de lutita y el estado de alteración de la misma.

La zona alta de la quebrada, constituida por el lecho de las calizas, muestra un alto grado de fracturación, por lo cual si los intersticios están saturados, esto también contribuye a reducir la resistividad.

5.9.1.9 Tomografía SONN9

La Tomografía se realizó en la zona media del sector de las calizas. Esta se realizó sobre un plano paralelo a la topografía y perpendicular al drenaje en la zona alta del Cerro Evangelisto. En este, la escorrentía se mueve en dirección a la parte baja de la Quebrada La Cruz.

En el área, se observan rocas de origen volcánico, posiblemente rodados de la zona alta, con un alto grado de alteración. No se observan evidencias de dolinas en el sector. En la figura 5.36, se observa un aspecto del sitio seleccionado para realizar la tomografía. El dispositivo empleado en esta tomografía es el Wenner y la inversión de los datos se ilustra en la figura 5.37.

En la misma se observa que las calizas alteradas se localizan en la base, a partir de los 15-20 metros de profundidad y su resistividad es mayor a los 15 Ω·m.

El horizonte superior está constituido por material de derrubio alterado con resistividades que van de los 5 Ω·m a los 10 Ω·m.

Figura 5.36. Tomografía SONN9, la dirección está señalada en línea punteada. Obsérvese al fondo el drenaje circundante.

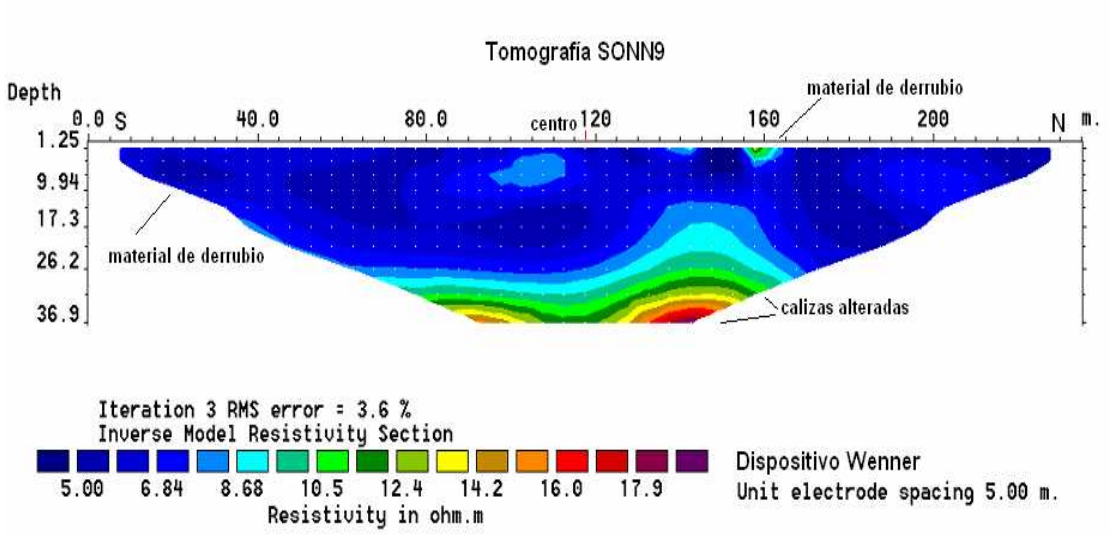


Figura 5.37. Inversión de datos de la Tomografía SONN9. El horizonte de calizas alteradas se observa a partir de los 15 metros.

5.9.1.10 Tomografía SanJ05

Esta tomografía se realizó próxima a la parte alta de la Quebrada Mariana, al SW de San José. En esta zona se observa un contacto entre las lutitas de la Formación Macaracas y el aglomerado de la Formación Playa Venado; al NE del Cerro Evangelisto.

La Tomografía se realizó próxima al margen derecho de la Quebrada Mariana (50 metros). El dispositivo empleado fue el Wenner, con una separación mínima entre electrodos de 4 metros.

Se trata de localizar el contacto entre la roca alterada, próxima al río y la lutita. La zona es un plano constituido básicamente por lutitas, sin embargo se

observa abundante material de origen volcánico disperso por la zona, probablemente derrubios. En la figura 5.38 se observa una vista de la zona de estudio.

La inversión de datos de la tomografía SanJ05 se muestra en el gráfico de la figura 5.39. Estos resultados indican que la Quebrada Mariana recorre por la zona del aglomerado volcánico ubicada al SW, ya que estas rocas afloran en este sector en donde se han determinado mayoritariamente. A partir de los valores de la resistividad (26-34 Ω·m), es evidente el grado de alteración de la roca en este sitio.

Habría que determinar el grado de porosidad de esta interfase. El resto de la tomografía muestra un alto contenido de lutitas (5-9 Ω·m).

Figura 5.38. Vista parcial de la zona de estudio de la tomografía SanJ05.

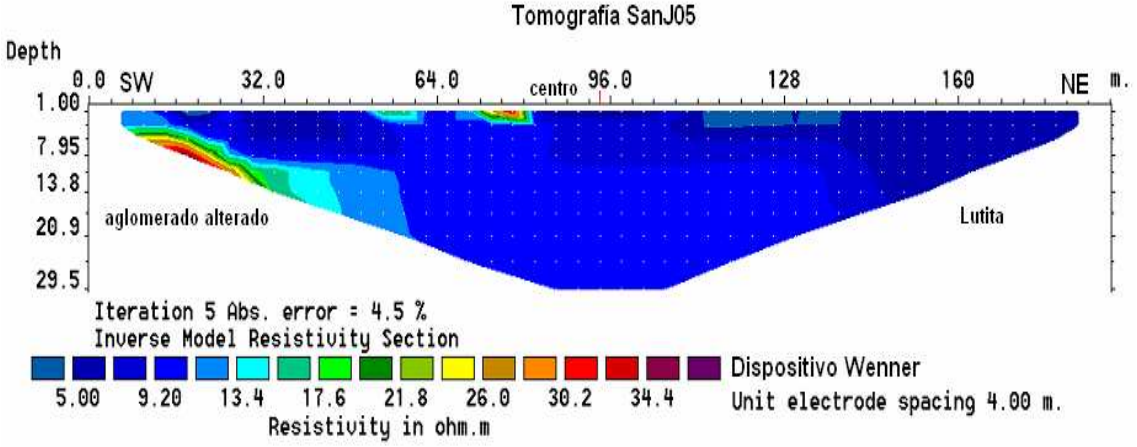


Figura 5.39. Inversión de datos de la tomografía SanJ05.

5.9.1.11 Tomografía SanJ06

La tomografía se realizó al NE de San José, el dispositivo empleado fue el Wenner, con una separación mínima entre electrodos de 4 metros. La Zona esta caracterizada por estratos de lutita no consolidada, de potencia considerable. En estos, la alternancia de capas de toba fracturada de pequeño espesor es muy común.

En el sector se han realizado perforaciones con muy bajo rendimiento; se localiza sobre un plano con desniveles topográficos suaves. Sin embargo, algunos cortes que se han realizado en el área muestran que las capas se inclinan en dirección NW (ver la figura 5.40); es necesario destacar que el centro de la tomografía se ubica perpendicular a un drenaje. En el gráfico de la figura 5.41, se muestra el resultado de la inversión de los datos de la tomografía.

La imagen muestra que las lutitas (5-6 Ω·m), están distribuidas por todo el sector de la tomografía. Por otro lado, hacia la zona central (64 m), se observa un aumento de la resistividad debido al fracturamiento de las capas de toba, no se descarta que este sea un "*artefacto*" introducido por el programa de inversión, lo cual algunas veces suele suceder (Himi, 2009).

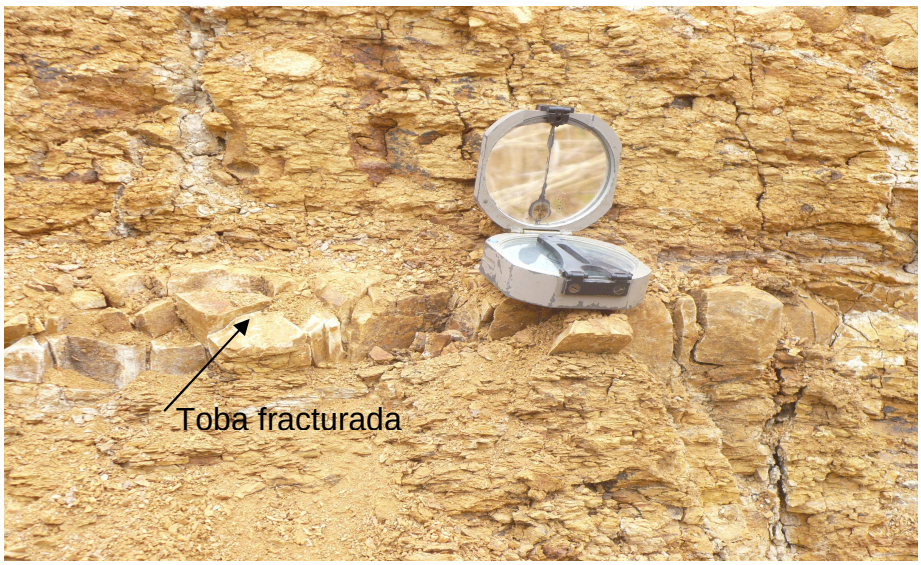


Figura 5.40. Sección de un corte de la zona en que se realizó la tomografía SanJ06. Nótese el espesor de la capa de lutita comparado con el de la toba.

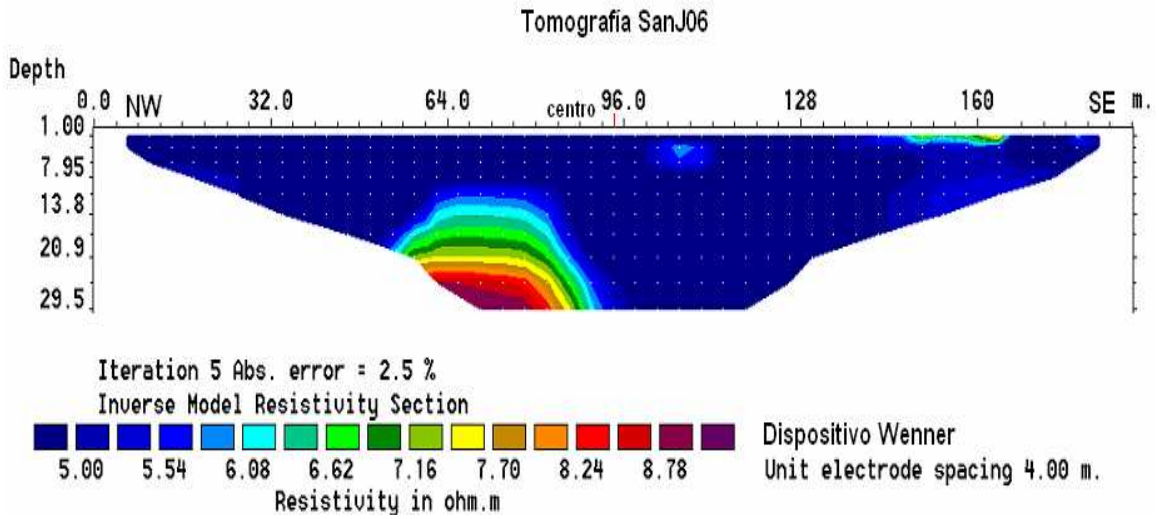


Figura 5.41. Inversión de datos de la tomografía SanJ06. Nótese en la parte central el aumento de la resistividad.

5.9.1.12 Tomografía SanJ07

Esta tomografía se realiza como una continuación de la SanJ06, coincidiendo el electrodo numero 1 con el 48 de la primera y el centro se localiza sobre un drenaje. En la figura 5.42, se muestra la inversión de los datos de la misma.

El resultado indica que este sector, como era de esperar, también está constituido por lutitas con una resistividad de 5 Ω·m. Hacia la zona central (64 m), se observa una variante que se refleja en un aumento de la resistividad (más de 5 Ω·m), lo que puede representar un ensanche del drenaje en profundidad, esta representa una zona de debilidad de las fracturas de la toba, como consecuencia quizás de un plegamiento.

En la parte superior (0 a 3 metros), se observa que los materiales constitutivos del drenaje tienen un espesor mínimo, debajo se nota un horizonte de lutitas, indicando la separación entre estos, con lo que el aporte de agua está limitado. Nótese las capas de lutitas a un costado de la zona resistiva (5 Ω·m).

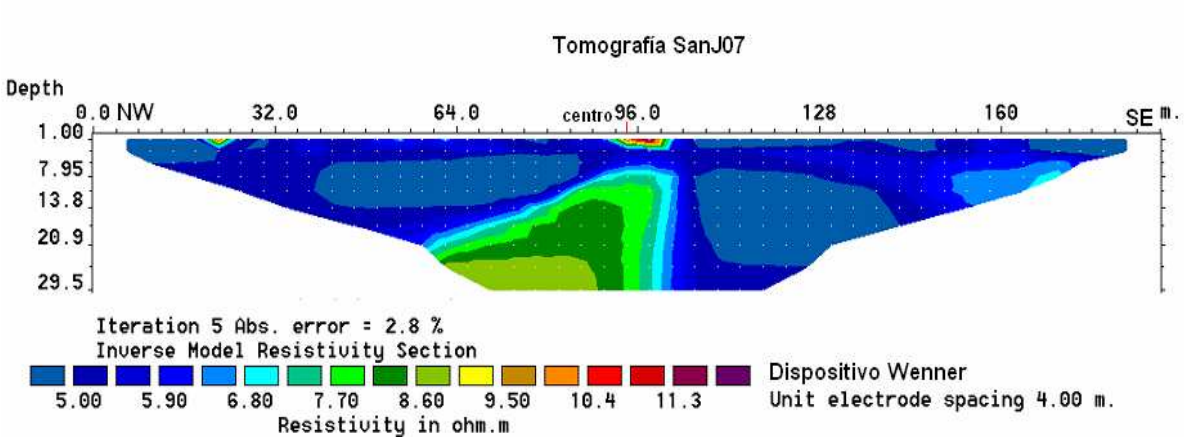


Figura 5.42. Inversión de datos de la tomografía SanJ07.

5.9.1.13 Tomografía SanJ04

Esta tomografía se realizó en un sector próximo a la SanJ07 (350 metros), al NW de la Quebrada Mariana (margen izquierdo). La zona está constituida por un estrato alternado de lutitas, areniscas y tobas sobre un basamento de andesitas porfídicas.

El drenaje es muy intenso en este sector y en algunos puntos aflora la andesita alterada; en las áreas de drenaje se observan las tobas y las areniscas. En la Figura 5.43, se presenta la inversión de los datos obtenidos.

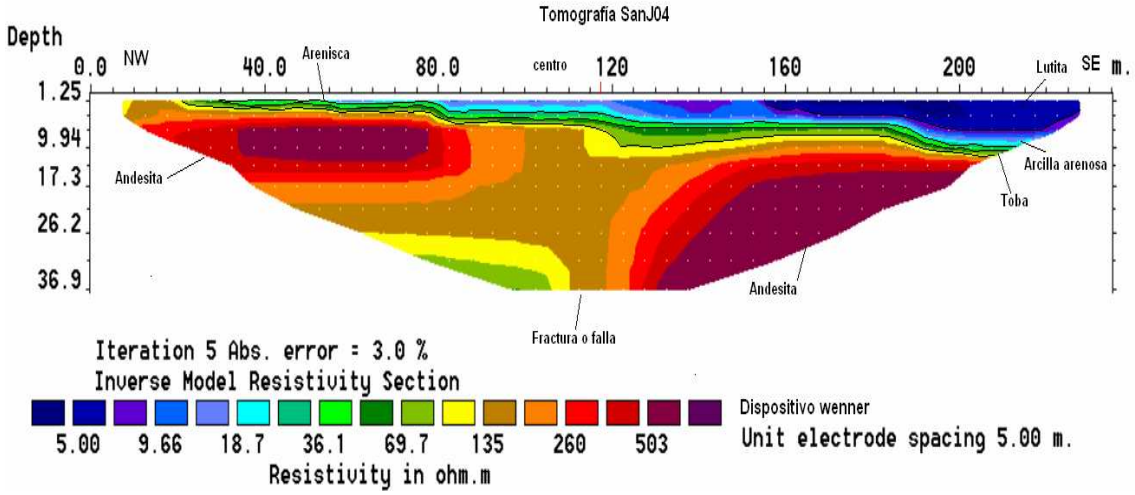


Figura 5.43. Interpretación de la tomografía SanJ04 mediante inversión.

Los resultados se interpretan de la manera siguiente:

Hacia el SE se observa la respuesta de una capa de lutita con resistividad de 5 Ωm y cuyo espesor aumenta en esta dirección.

Debajo de la capa de lutita se observa la respuesta de una capa de arcilla arenosa, cuya resistividad es del orden de 18.7 Ω·m. Esta capa es de un espesor variable en todo el perfil, partiendo de 2 a 3.5 metros.

En la tomografía también se identifica la respuesta de un horizonte de arenisca cuya resistividad es del orden de 36 Ω·m. El espesor de esta capa es muy variable a lo largo del perfil con un promedio de 2 metros.

Debajo de la capa de arenisca se observa la respuesta de un horizonte de tobas cuya resistividad 69.7 Ω·m. Esta toba alcanza un espesor de 5 metros en la zona central de la tomografía.

Todo el paquete sedimentario mencionado cubre menos del 70% de la tomografía ya que debajo de éste se identifica la roca andesítica con grados de alteración.

Como quiera que el terreno tiene un drenaje intenso, no se identifico sobre el terreno, en el centro de la tomografía, una posible falla o fractura, ya que estaría cubierta por el relleno arcilloso.

Al NW, a 100 metros de esta tomografía, se realizó un sondeo mecánico el cual se ilustra en la Figura 5.44, de acuerdo a la tomografía es evidente que los estratos de arenisca y toba son de menor espesor en la dirección SE.

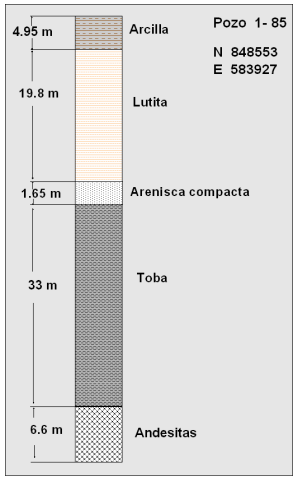


Figura N5.44. Columna litológica del pozo No. 85.

5.9.1.14 Tomografía SanJ08

Esta tomografía se realizó en un sector próximo a la SanJ04 (a 400 metros), al NW de la Quebrada Mariana (margen izquierdo). La zona está constituida por un estrato alternado de lutitas, areniscas y tobas sobre un basamento de andesitas porfídicas.

En este sector, el drenaje es muy intenso y en algunos puntos aflora la andesita alterada. En la figura 5.45, se presenta la inversión de los datos obtenidos.

Los resultados de la inversión muestran que la parte superior del terreno es homogéneo y tiene resistividad de 5 Ωm. Este horizonte geoelectrico representa el estrato de lutíta y puede medir, a lo largo del perfil, hasta 15 metros.

El horizonte subsiguiente, cuya resistividad es de 33 Ω·m, está constituido por areniscas con un espesor de 3-5 metros. Debajo de este horizonte se identifican las tobas con resistividades de 61 Ω·m, estas pueden llegar a medir también de 3 a 5 metros de espesor. Luego, debajo de este horizonte, se identifican las andesitas porfídicas, con resistividades que van de 145 a 230 Ω·m por el grado de alteración.

La variación de la topografía del terreno es suave, sin embargo el sustrato tiene orientación hacia SE, lo cual es indicativo de que las aguas subterráneas se orientan en dirección a la Quebrada Mariana.

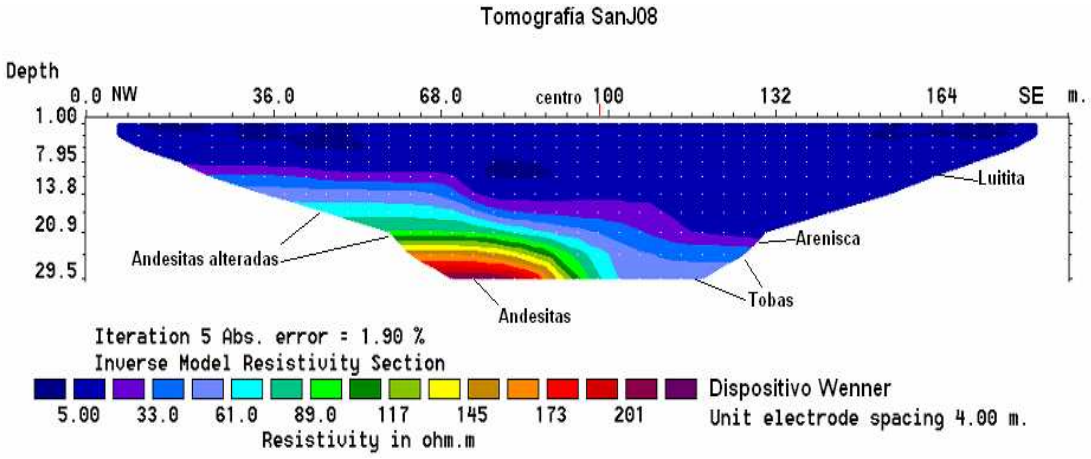


Figura 5.45. Tomografía SanJ08. En esta zona, la respuesta del material de relleno lutítico-arenoso se observa homogénea, el horizonte andesítico alterado tiene una orientación hacia el SE.

5.9.1.15 Tomografía SanJ09

Esta tomografía, contigua y paralela a la SanJ08. Se realizó a 380 metros de la misma, en la margen derecha de la Quebrada Mariana. En el sector no se observaron afloramientos y el drenaje es casi inexistente. El resultado de la inversión de los datos se muestra en la figura 5.46.

La inversión de los datos, muestra que el subsuelo de esta zona está bastante alterado, se puede esperar que las lutitas sean un componente principal del mismo, ya que la resistividad así lo indica (5 Ω·m).

Por otro lado, a pesar de que las resistividades son muy bajas, en el sector SE se observa una gradual disminución de la resistividad (7.10 a 5 Ω·m), en dirección NW. Este sector puede ser parte del dique diorítico que se encuentra a menos de 800 metros del punto en análisis; esto supone un alto grado de alteración del mismo en esta zona. Este resultado se podría interpretar como una zona de contacto, pero sería cuestión de profundizar con más datos geoeléctricos y geológicos sobre el sector.

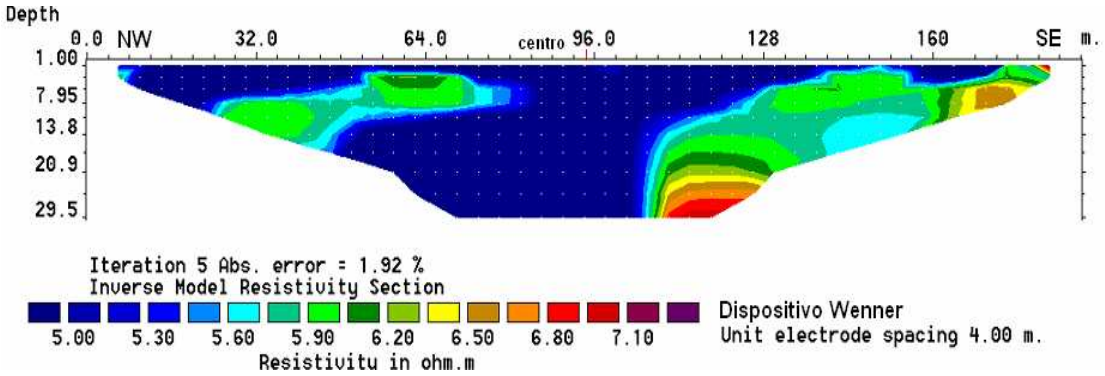


Figura N5.46. Inversión de datos de la tomografía SanJ09.

5.9.1.16 Tomografía SanJ10.

La tomografía se realizó en el sector Este de la Población de San José, en la zona de contacto entre el dique de naturaleza diorítica mencionado anteriormente y los sedimentos de la Formación Macaracas. Se trata de una zona muy intemperizada, en la que solo se observan afloramientos en la parte alta del dique.

El dispositivo empleado es el Wenner, con un espaciamiento mínimo entre electrodos de 4 metros, la inversión de los datos se presenta en la figura 5.47.

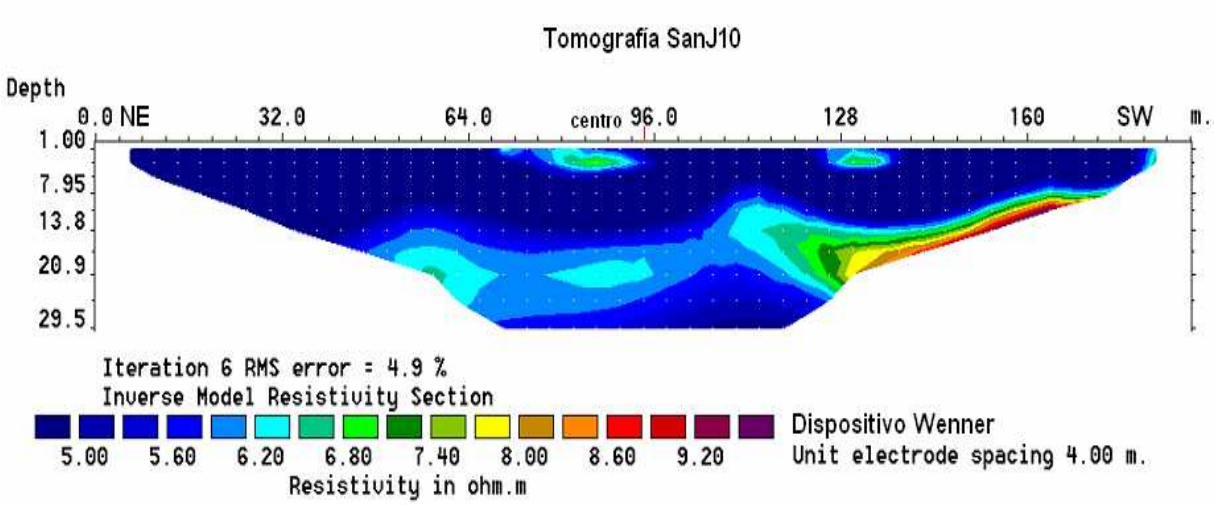


Figura 5.47. Inversión de los datos de la tomografía SanJ10.

Al ubicar el centro de la tomografía sobre un drenaje se espera encontrar una zona de alteración en profundidad por el cual las aguas subterráneas fluyan, este flujo puede ser vertical y horizontal (Seaton & Burbey, 2002).

La inversión de los datos de la tomografía SanJ10, muestra que hay una distribución de los materiales conductores en casi toda y cuya resistividad es de 5 Ωm.

En la zona central, a 14 metros de profundidad se observa un cambio a 9 Ωm. Esto corresponde a la respuesta eléctrica del material de derrubio alterado acumulado en el sector. Esto se confirma, sobretodo, si consideramos que esta parte del dispositivo está próxima al pie de monte.

En la figura 5.48, se aprecia la base de los estratos constituyentes de la zona NE de la tomografía, justo sobre la Quebrada Mariana. Los horizontes de lutitas se aprecian en ambos bordes de la quebrada.

Figura 5.48. Afloramiento de lutita, areniscas y tobas ocupa la parte superior y en la base de la cascada está el contacto de la andesita en la Quebrada Mariana.

5.9.1.17 Tomografía SanJ11

Esta tomografía se realizó en el sector SE en la población de San José, en el Barrio Los Llanitos. En esta zona se han realizado perforaciones con resultados diversos, en el sentido geológico. En algunos sectores, se han encontrado lutitas alternadas con areniscas y tobas; en otros, paquetes de arcilla con aglomerados andesíticos.

La tomografía se realiza próxima a un drenaje que, durante la época lluviosa, presenta una escorrentía y en el lecho de la misma se observan andesitas alteradas y fracturadas.

En este sector, muy próximo al drenaje, se realizó una perforación en la cual se determinaron en su orden lutitas, aglomerados, areniscas y andesítas, esta se observa en la figura 5.49. Los datos invertidos se muestran en la figura 5.50.

La inversión de los datos muestra que cuanto más alejado se esté del drenaje o quebrada, el paquete lutítico será mayor, ya que, hacia el SW la resistividad disminuye considerablemente de 16 a 5 Ω·m. En la inversión se puede identificar la respuesta de la arenisca con resistividades del orden 16-30 Ωm, sin embargo no es evidente la presencia del aglomerado.

Hacia la zona NE la resistividad aumenta de 56 a casi 500 Ωm; esto indica que en el sector NE la roca fresca está muy próxima a la superficie, lo cual es uno de los pocos casos que se han encontrado en toda la región, ya que los afloramientos de roca fresca, casi siempre se encuentran en la parte alta de los cerros o en algunas quebradas. De ser esto cierto, se pueden identificar aquellos sectores próximos al área en los que se localice este tipo de roca fracturada.

Figura 5.49. Descripción de la litología cortada por el sondeo nº 82.

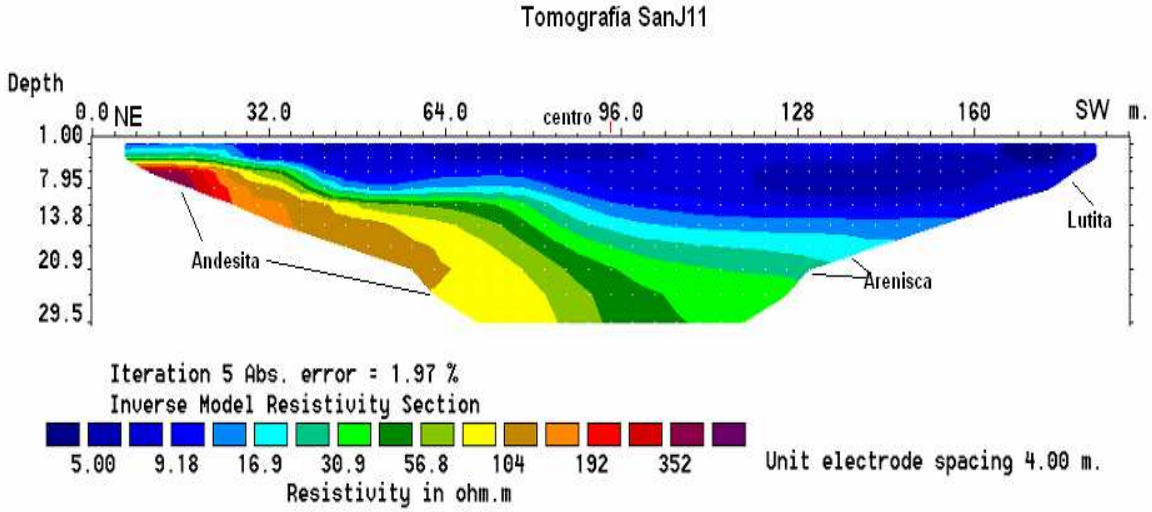


Figura 5.50. Inversión de datos de la tomografía SanJ11.

5.9.1.18 Tomografía SanJ12

Esta tomografía se realizó al NE de la población de San José, próxima a la zona de contacto entre las formaciones Playa Venado y Macaracas. El sector está constituido básicamente por arcillas y material de derrubio muy alterado y se encuentra sobre una planicie ondulada arriba de la Quebrada Mariana. La inversión de los datos de campo se muestra en la figura 5.51.

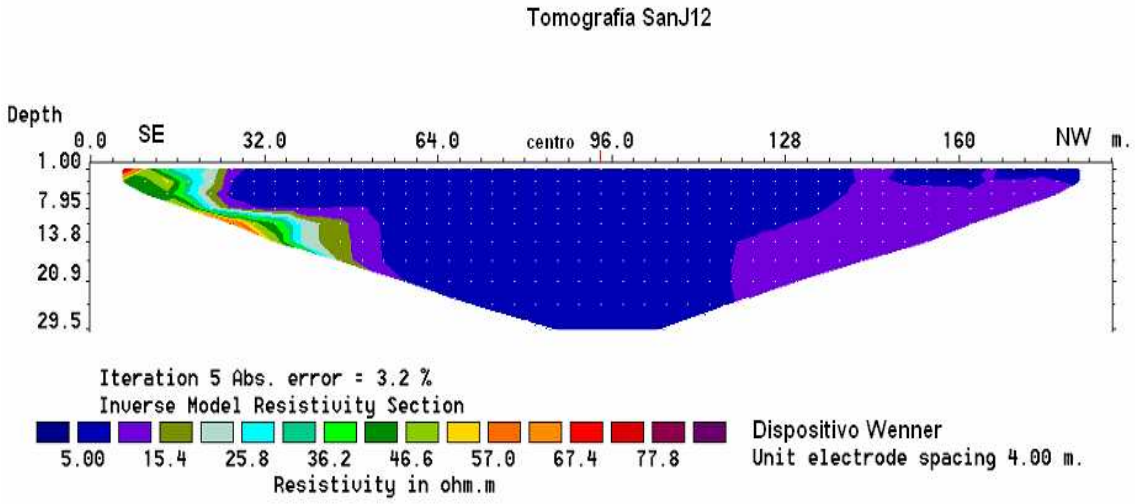


Figura 5.51. Inversion de los datos de la tomografía SanJ12.

Estos resultados sugieren que la roca alterada se localiza en el sector SE, con una resistividad de 26 a 88 Ω·m. El resto del perfil, en dirección NW, está constituido por material de derrubio alterado (5-25 Ω·m).

5.9.1.19 Tomografía SanJ12A

Esta tomografía se realizó tomando como centro el eje de la Quebrada Mariana, al NE de la Población de San José, durante el mes de marzo del 2006 correspondiente a la época seca, lo cual facilito la obtención de los datos.

El área constituye una terraza aluvial en contacto y alineada con el intrusivo diorítico que sirve como barrera impermeabilizante. Al Este, sobre la terraza se identifica material de derrubio de la zona alta.

En el margen izquierdo (W) se han observado horizontes no consolidados de lutítas, alternadas con tobas y areniscas, estas últimas de pequeño espesor.

La inversión de los datos se muestra en la figura 5.52. Este resultado muestra que el sector E es el más resistivo (25-40 Ω·m), es la respuesta de la roca intrusiva alterada, también puede ser producida por el material de derrubio acumulado en este sector. El lecho de la quebrada, con una resistividad de 9 Ωm, está constituido por arena fina mezclada con material orgánico y arcilloso producto del arrastre de las corrientes. Los sedimentos lutíticos, presentes en todo el sector tienen una resistividad de 5 Ω·m. Sobre este perfil se perforó un pozo, el cual es utilizado para regadío con un caudal de 2 L/s, no existe un registro litológico del mismo. En toda la región, los caudales generalmente oscilan entre 2 y 4 L/s y en casos excepcionales 7 L/s.

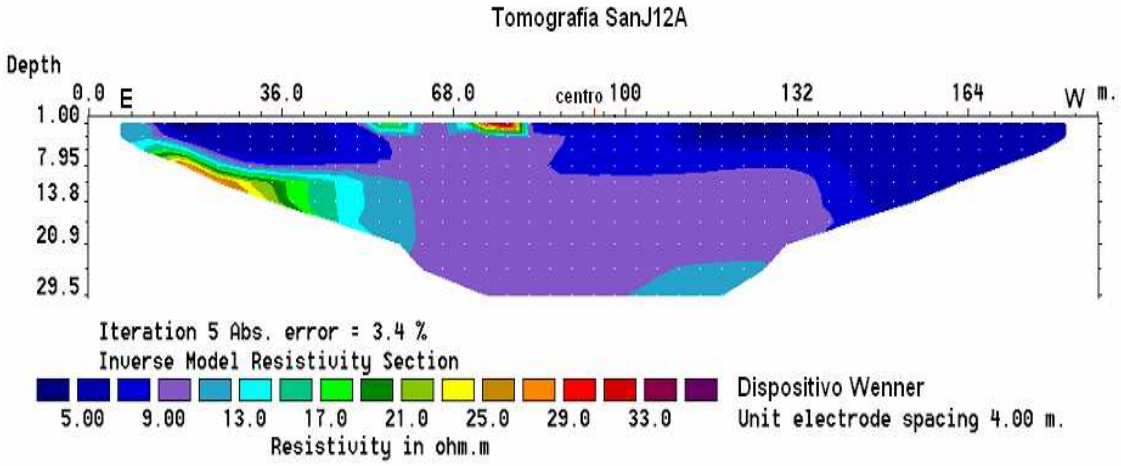


Figura 5.52. Resultados de la inversión de los datos de la tomografía SanJ12A.

5.9.1.20 Tomografía SanJ17

Esta tomografía, se realizó en la terraza formada en la confluencia de las Quebradas Mensabé y Mariana al NE de la Población de San José; limitada al E por el intrusivo diorítico y al W por los estratos lutiticos.

La zona, esta constituida por material de arrastre de las quebradas; el cual en este caso, consiste de lutitas, areniscas calcáreas y conglomerados. Al pie de monte se aprecian derrubios y material de la zona de alteración del intrusivo.

Para analizar esta tomografía se ha elaborado un modelo sintético de la distribución de la resistividad en el sector. Al modelo se le han asignado los valores 5 Ω·m para las capas menos resistivas, 120 Ω·m para la zona intermedia y

225 Ω·m para la resistiva, los cuales se proponen a partir de los datos de campo. El modelo y la tomografía se aprecian en la figura 5.53.

La inversión del modelo sintético mediante el *smoothness constrained*, da como resultado una variación gradual de los horizontes desde la parte superior. El proceso es inestable y no se logra una convergencia aún en la novena interacción. Los horizontes son suavizados y la capa más conductora esta sobreestimada en 10 Ω·m y su espesor menor, el espesor de la capa central es mayor y su resistividad se aproxima al valor propuesto de 225 Ω·m. Estos casos de acuerdo a Olayinka & Yamaranci (2000), se proponen como una equivalencia en el modelo.

La inversión del modelo sintético, mediante el método de inversión robusta, converge desde la cuarta iteración. El espesor de la capa superior de lutita (5 Ω·m), es equivalente al obtenido en la inversión de los datos de campo (8 m). En este sentido, la inversión robusta resuelve adecuadamente el problema de la equivalencia, ya que, la estimación del modelo y los datos de campo, son similares.

A partir de los datos de campo se puede interpretar que la zona ha tenido periodos alternados de relleno, en donde la capa superior estaría constituida por materiales lutíticos y areniscas-calcáreas y algo de materia orgánica (resistividad de 5 Ωm). Este conjunto tiene un espesor aproximado de 8 metros. Luego, a partir de los 8 metros de profundidad se observa una capa resistiva que alcanza los 21 metros de profundidad.

Esta capa estaría constituida por materiales rodados de las quebradas y de derrubio de la zona alta del área, cuya resistividad estaría entre 59 Ω·m y 194 Ω·m.

La respuesta hacia el W, recibiría la influencia de la zona de las quebradas y hacia el E la barrera del dique diorítico, obsérvese que la resistividad aumenta en esta dirección.

Debajo de este horizonte, a los 21 metros de profundidad, la resistividad disminuye gradualmente de 59 a 5 Ω·m, considerando que esto correspondería a otro periodo de las quebradas y estarían constituidas por material de relleno de tipo lutítico.

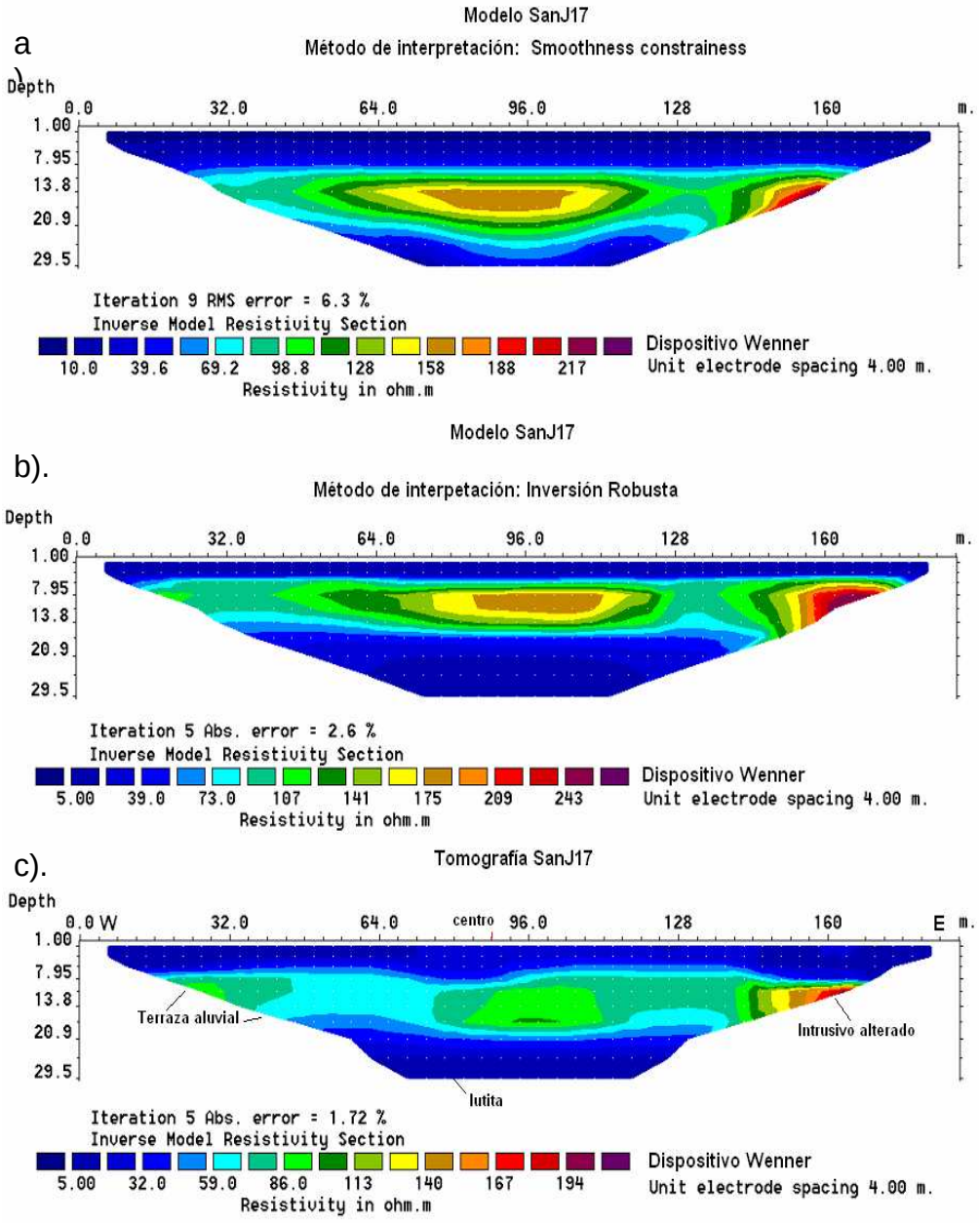


Figura 5.53. a). Inversión del modelo sintético mediante smoothness constrained b). Inversión del modelo mediante la inversión robusta c). inversión de los datos de la tomografía SanJ17, mediante inversión robusta.

Esta terraza tiene una dimensión menor que las del Río Mensabé (con una extensión aproximada de 300 metros de longitud y 300 m de ancho).

Las Quebradas Mensabé y Mariana en la zona media tienen un cause del orden de los 7 metros y en algunos sectores profundidades de 2 metros.

5.9.1.21 Tomografía SanJ19

Esta tomografía se realizó en el sector de Los Llanitos al Sur de San José, a 200 metros del Pozo No. 89, cuya descripción se muestra en la figura 5.54.

El sector está caracterizado por un suelo arcilloso y se observan fragmentos de aglomerado alterado; el drenaje sigue el plano de la llanura. De ahí que la tomografía se hizo perpendicular a la línea del mismo. La característica de esta zona es que se perforan los pozos y luego se agotan.

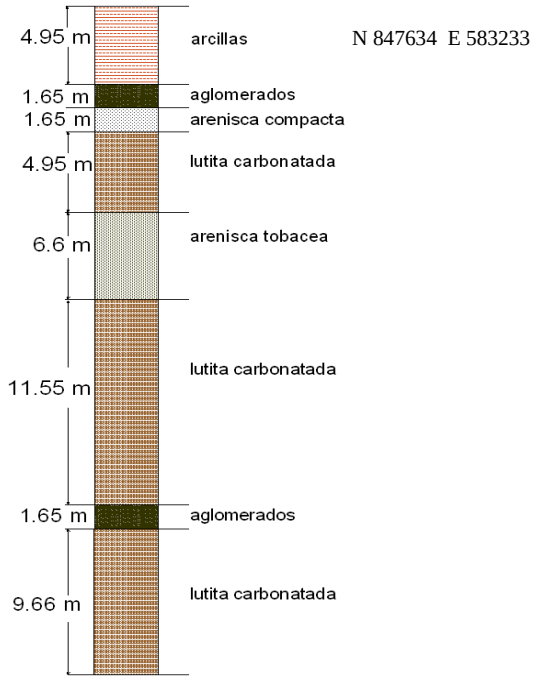


Figura 5.54. Descripción estratigráfica del Pozo No. 89, perforado por el IDAAN, el caudal del mismo fue de 6 L/s.

La inversión de los datos se muestra en la figura 5.55. La misma muestra que la zona es muy compleja estratigráficamente, lo cual se colige con la información obtenida a partir de la perforación (No. 89).

Esta tomografía, debido a la distribución de la resistividad, es un ejemplo de la interpretación por *inversión robusta*. Hacia la zona central se observa que la resistividad tiene valores máximos de 278 Ω·m, lo cual correspondería a la respuesta de los aglomerados a partir de una profundidad de 2 metros. Como se puede observar, la resistividad varia en todo el horizonte debido a la fracturación del mismo hasta valores de 68 Ω·m, se estima que la litología cambia a la profundidad de 20.9 metros.

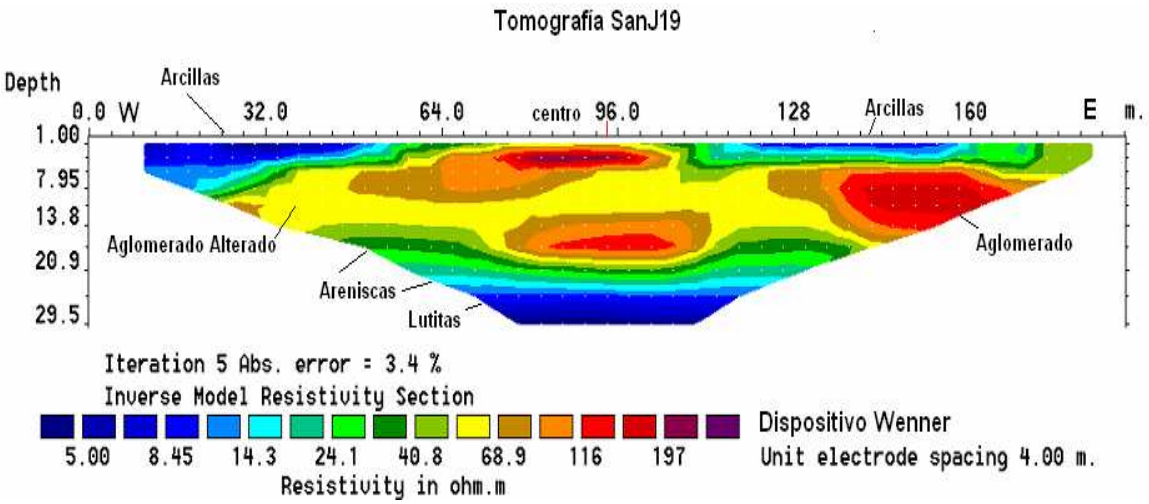


Figura 5.55. Inversión de datos de la tomografía SanJ19. La respuesta correspondiente a los aglomerados alterados, puede confundirse con la de las areniscas.

A esta profundidad la respuesta corresponde a la de las areniscas con una resistividad entre 14.3 y 40.8 Ω·m; este estrato se identifica hasta 25 metros. A esta profundidad se identifica la lutita con una resistividad de 5 Ω·m.

5.9.1.22 Tomografía SanJ20

Esta tomografía se realizó en el entorno de la Quebrada El Paradero, en esta zona se han realizado varias perforaciones en las que han identificado potentes estratos de margas y calizas marguiferas. Como lo es el pozo No. 73, cuyo diseño se muestra en la figura 5.56. En el sector se observa material arcilloso y de derrubio de la zona alta del Cerro La Mesa, muy próxima al contacto entre las Formaciones Macaracas y Playa Venado.

La tomografía SanJ20, se realizó a 250 metros al NW del pozo No. 73, con el objetivo de estudiar la respuesta geoeléctrica de este sector; esta se muestra en la figura 5.57.

A partir de la inversión de los datos de la tomografía y la comparación con la perforación adyacente, es evidente que la geología del subsuelo está constituida por calizas marguíferas, con una resistividad entre 5 y 41 Ωm. Los primeros 2 metros están constituidos por material de derrubio incoherente y alterado, de ahí que la resistividad alcance valores máximos de 100 Ωm.

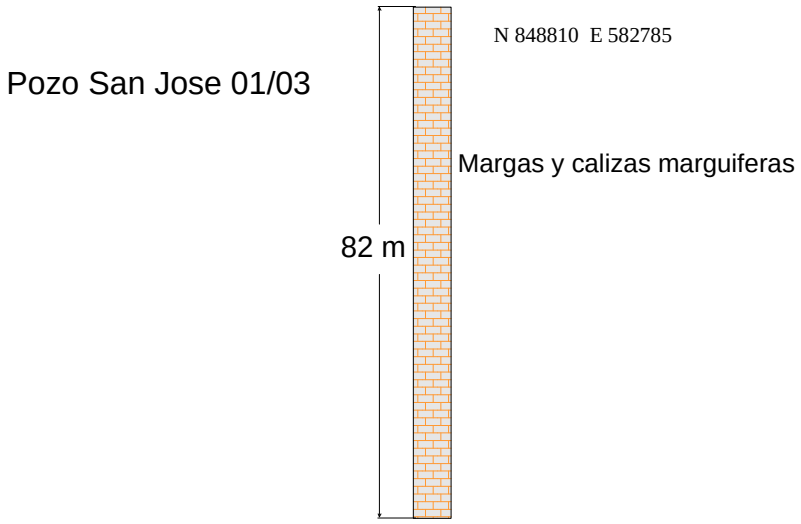


Figura 5.56. En este pozo se obtuvo un caudal de 1 L/s, con agua de muy baja calidad, por lo que su uso para consumo humano se descarto.

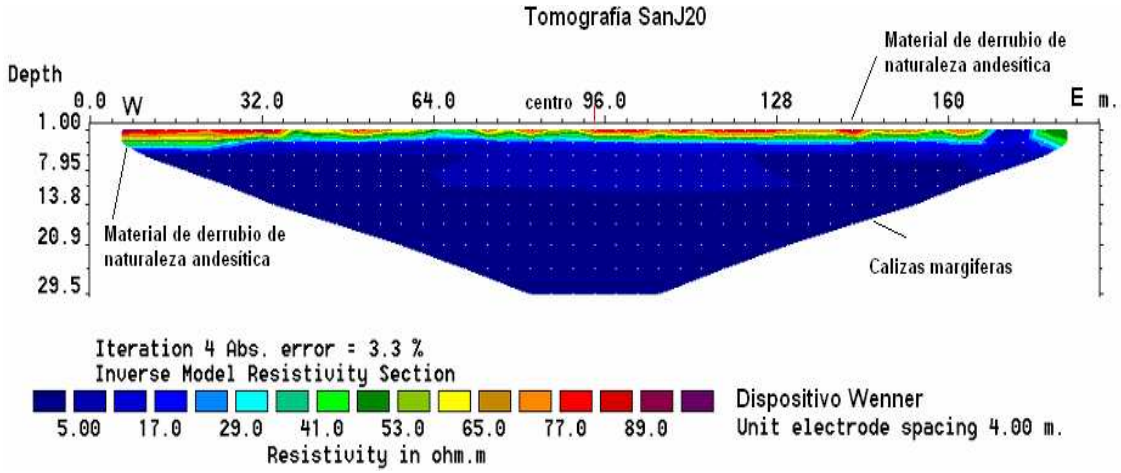


Figura 5.57. Inversión de los datos de la tomografía SanJ20; la respuesta en superficie es debida a la poca conectividad de los materiales.

5.9.1.23 SEV-S SANJ1

Este sondeo se realizó en el sector de Los Llanitos al SE de la población de San José, la interpretación se presenta en la figura 5.58. A una distancia de 230 metros al norte de este SEV, se realizó el sondeo mecánico No. 84 en el cual se obtuvo un rendimiento de 3.3 L/s, adjunto al SEV-S SANJ1, se describe la estratigrafía.

En la inversión del sondeo electroresistivo, de arriba hacia abajo, resulta lo siguiente:

Una capa de suelo arcilloso con una resistividad de 16.0 Ω·m y cuyo espesor es de 1.6 m.

Una capa de lutitas con un espesor de 10.9 metros y cuya resistividad es de 2.8 Ω·m.

Una capa de arenisca arcillosa con una resistividad de 22.0 Ω·m y un espesor de 6 metros.

Una capa de lutitas con resistividad de 2.5 Ω·m y un espesor de 36 metros.

La última capa es de andesitas con una resistividad de 240 Ω·m.

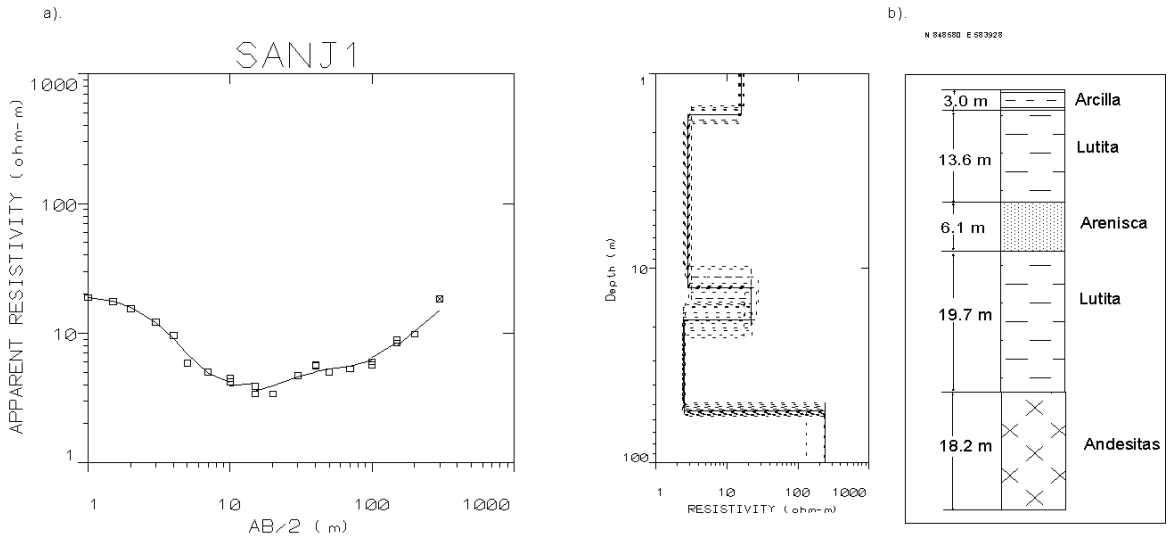


Figura 5.58. a). Interpretación de los datos del SEV-S SANJ1. b). Descripción de la geológica de sondeo mecánico nº 84.

A la profundidad de exploración y debido al espesor de la capa, en el modelo de equivalencia el método de interpretación muestra una inestabilidad en la obtención de la tercera capa.

5.9.1.24 SEV-S SANJ2

Este sondeo se realizó en el sector de La Mandinga al NE de la población de San José, la interpretación se presenta en la figura 5.58.

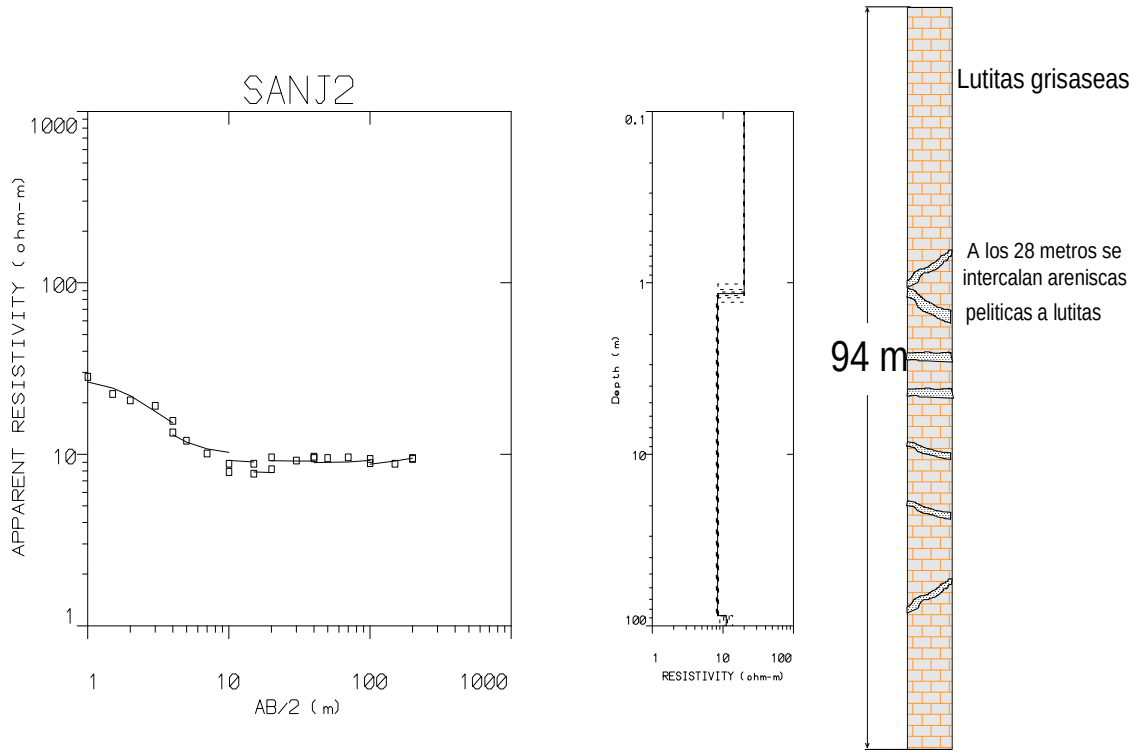


Figura 5.58. Interpretación mediante inversión del SEV-S SANJ2. A la derecha la descripción estratigráfica del sondeo mecánico No. 90. La posición del pozo es N 849750 E 584500.

Este sector es una planicie a la salida de la población de San José, el sitio está constituido por un suelo arcilloso de coloración pardusca, no se observan afloramientos, sin embargo, a 500 metros del sitio se han realizado dos sondeos mecánicos con resultados fallidos; en estos, la estratigrafía esta constituida por lutitas con intercalaciones de areniscas pelíticas, con un caudal mínimo como es de esperar en estos materiales, ver figura 5.58.

La interpretación de este sondeo electroresistivo mediante la inversión de los datos es la siguiente:

Una capa de suelo arcilloso con una resistividad de 19.97 Ω·m, cuyo espesor es de 1.2 m.

Una capa de lutitas con un espesor de 86.0 metros y una resistividad de 8.3 Ω·m.

La tercera capa cuya resistividad es de 11.1 Ω·m, de acuerdo a la perforaciones que se han realizado en el área, podría ser una capa de

arcilla arenosa, cuyo espesor no se puede estimar por el método de interpretación.

5.9.2 Sondeos geoeléctricos del sector de La Palma y alrededores.

En el sector de La Palma se interpretaron cinco (5) sondeos eléctricos Offset Wenner (SEV-OW), un (1) sondeo Schlumberger y una tomografía (ERT), para ello se aprovecho la información geológica disponible en el área; en este sentido, se tomaron como representativos los sondeos mecánicos 116, 118, 119, 121 y el 127, descritos en el anexo 2. La localización de los sondeos geoeléctricos se presenta en la figura 5.59.

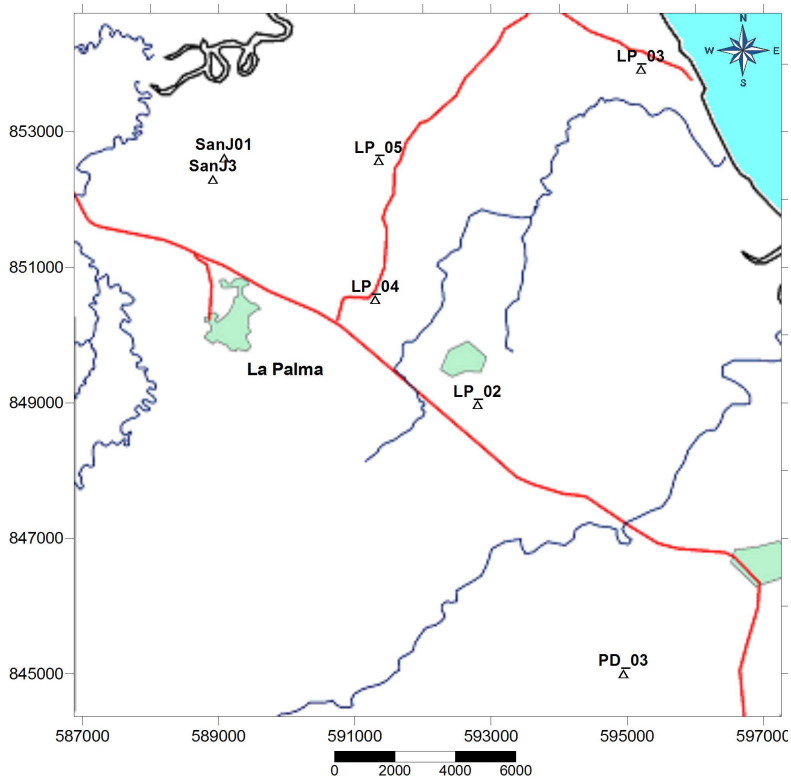


Figura 5.59. Distribución de los sondeos eléctricos realizados en el sector de La Palma.

La zona en general está constituida por rocas de origen volcánico. Las que afloran fuertemente alteradas, sin embargo, hacia el SW y NE de la población se han encontrado afloramientos de sedimentos no consolidados de lutitas, tobas andesíticas, areniscas y calizas, con características similares a las de San José. Al NE hacia La Candelaria se han identificado paleocanales constituidos por areniscas y conglomerados, no consolidados.

5.9.2.1 SEV-OW PD_03

Este sondeo se realizó próximo a La Palma en dirección a la Población de Pocrí, la interpretación se presenta en la figura 5.60. El sector está constituido por material de derrubio, fuertemente alterado, de los cerros aledaños.

La interpretación de este sondeo electroresistivo mediante la inversión de los datos es la siguiente:

Una capa de suelo de material indiferenciado con una resistividad de 46.7 Ω·m y un espesor de 0.5 m.

Una capa de arcilla arenosa cuya resistividad es de 14.7 Ω·m, cuyo espesor es de 1.9 m.

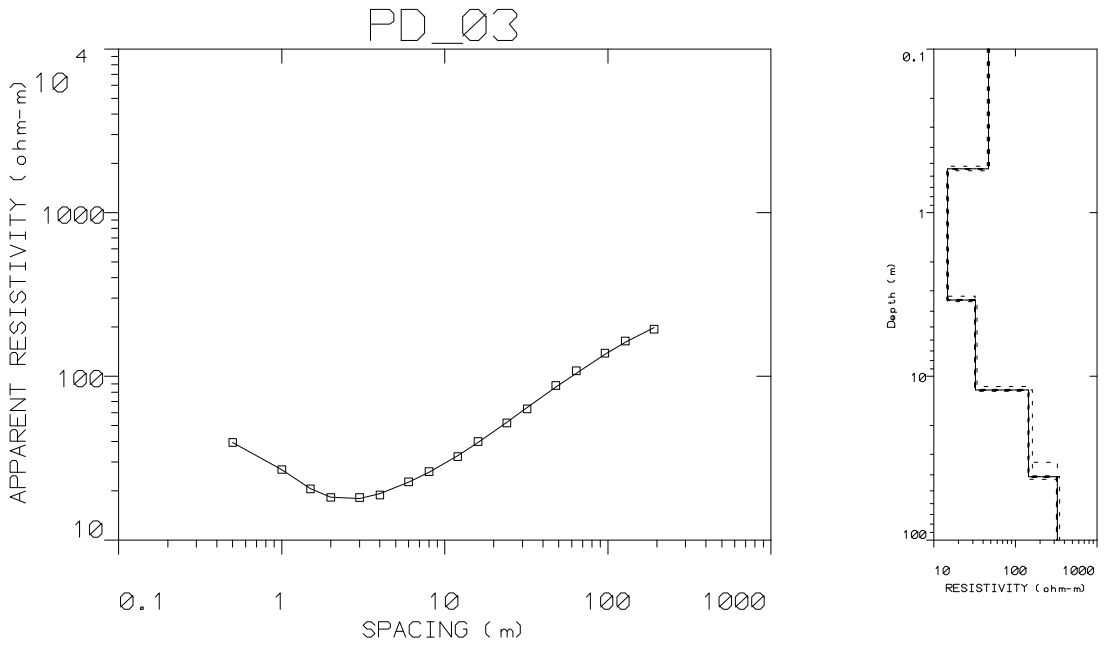


Figura 5.60. Interpretación del SEV-OW PD_03, obsérvese los modelos de equivalencia obtenidos en la inversión correlacionada con el pozo No. 119.

Una capa de arenisca arcillosa con una resistividad de 32.3 Ω·m y un espesor de 8.7 m.

Una capa de andesita alterada con un espesor de 29 metros y una resistividad de 145.2 Ω·m.

Luego se localiza el basamento andesítico con una resistividad de 327 Ω·m.

5.9.2.2 SEV-OW LP_02

Este sondeo se realizó al ESE de La Palma también en dirección a la Población de Pocrí, la interpretación se presenta en la figura 5.61.

La interpretación de este sondeo electroresistivo mediante la inversión de los datos es la siguiente:

Una capa de suelo de material arcilloso con una resistividad de 9.0 Ω·m y un espesor de 0.3 m.

Una capa de lutita cuya resistividad es de 1.8 Ω·m, con un espesor de 0.9 m.

Una capa de arenisca arcillosa con un espesor de 4 metros y una resistividad de 29 Ω·m.

Una capa de andesita alterada con un espesor de 39.3 m y una resistividad de 160 Ω·m.

La última capa de andesita y cuya resistividad es de 313.6 Ω·m.

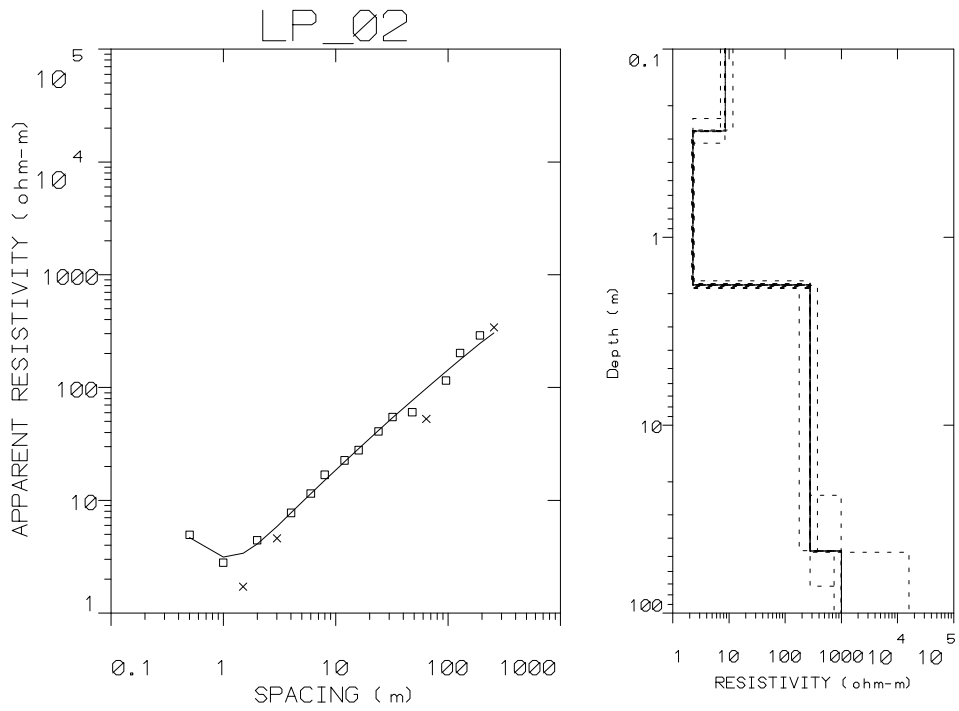


Figura 5.61. Interpretación del SEV-OW LP_02, este resultado fue obtenido a partir de la comparación con el sondeo mecánico No. 121.

5.9.2.3 SEV-OW LP_04

Este sondeo se realizó al E de La Palma, la interpretación se presenta en la figura 5.62. De acuerdo a los resultados, la inversión se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo de material arcilloso con una resistividad de 45 Ω·m y un espesor de .68 m.

Una capa de arcilla cuya resistividad es de 9.4 Ω·m, con un espesor de 4.3 m.

Una capa de arenisca lutitica con un espesor de 94.9 metros y una resistividad de 15.7 Ω·m.

La última capa cuya resistividad es de 112.7 Ω·m, es de andesita alterada.

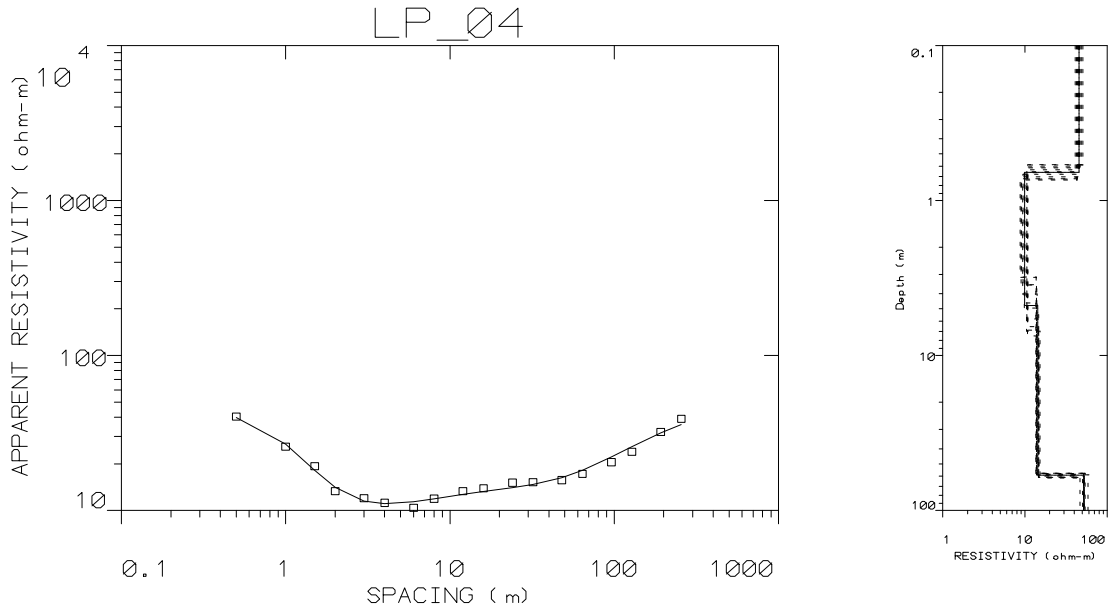


Figura 5.62. Interpretación del SEV-OW LP_04, este resultado fue obtenido a partir de la correlación con los sondeos mecánico No. 119.

5.9.2.4 SEV-OW LP_05

Este sondeo se realizó hacia el sector NE de La Palma, en el camino hacia La Candelaria. Esta zona tiene características geológicas diversas, ya que en la misma se pueden encontrar rocas de origen sedimentario y volcánico. La inversión de los datos se muestra en la figura 5.63, estos están correlacionados con el sondeo mecánico No. 119.

La interpretación basada en la inversión de los datos es la siguiente:

Una capa de suelo areno arcilloso con una resistividad de 126 Ω·m y un espesor de 1.0 m.

Una capa de areniscas lutiticas cuya resistividad es de 23.1 Ω·m y su espesor de 10.7 m.

Una capa de andesita alterada cuyo espesor es de 75 m con una resistividad de 45.7 Ω·m.

Una capa de andesitas cuya resistividad es de 230.1 Ω·m.

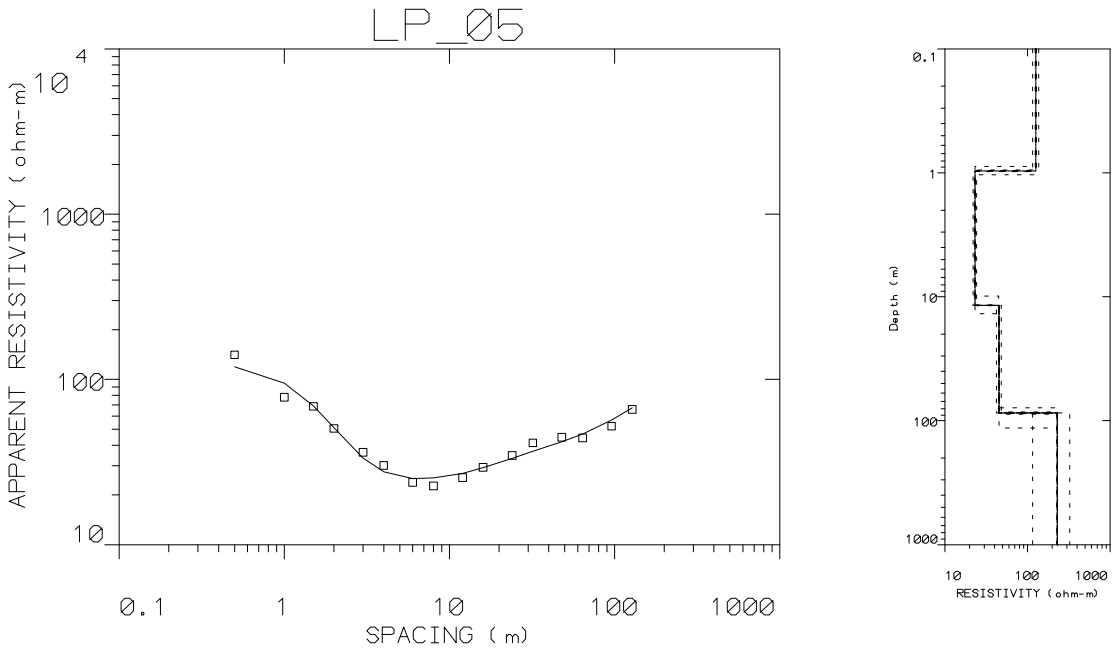


Figura 5.63. Interpretación del SEV-OW LP_05

5.9.2.5 SEV-OW LP_03

Este sondeo también se realizó hacia el sector NE de La Palma, en el camino hacia La Candelaria. La inversión de los datos se muestra en la figura 5.64.

Esta inversión se puede interpretar de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno-arcilloso con una resistividad de 53.6 Ω·m y un espesor de 1.2 m.

Una capa de lutitas cuya resistividad es de 1.4 Ω·m y su espesor de 0.7 m.

Una capa de arena arcillosa cuyo espesor es de 45 m con una resistividad de 28.0 Ω·m.

La última capa es de andesitas alteradas y cuya resistividad es de 40 Ω·m.

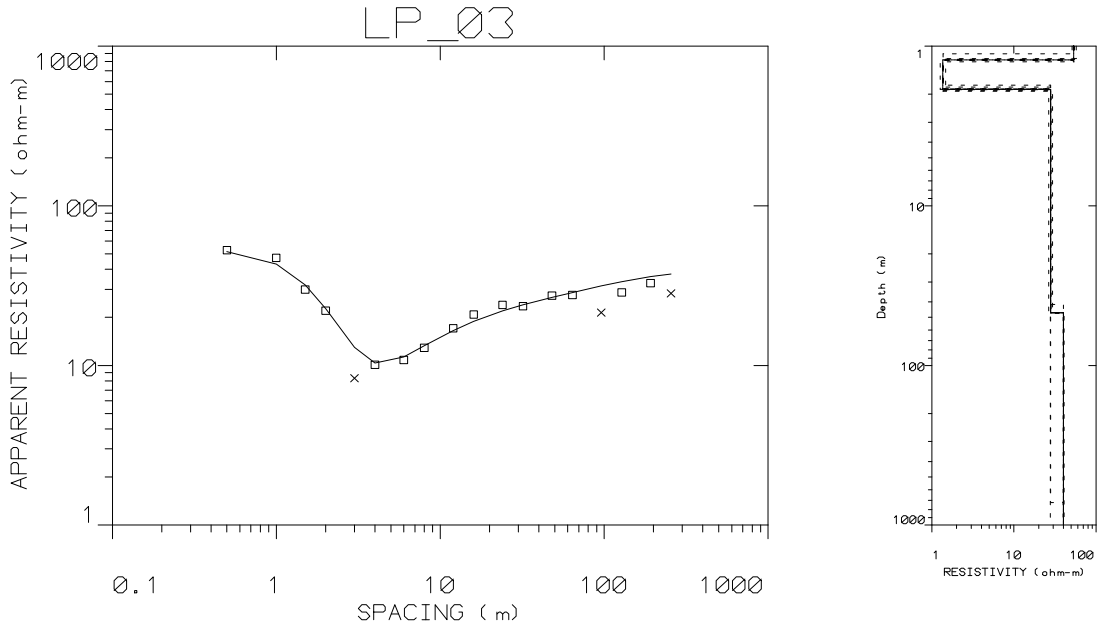


Figura 5.64. Inversión de los datos del SEV-OW.

5.9.2.6 SEV-S SanJ3

Este sondeo se realizó al NE de la Palma, esta zona consiste de una planicie con cobertura arcillo arenosa. En la figura 5.65 se ilustra de manera panorámica el sitio del sondeo.

El resultado de este sondeo se presenta en la figura 5.66 y la interpretación mediante la inversión de los datos es la siguiente:

Una capa de suelo de arcilloso con una resistividad de 27.2 Ω·m y un espesor de .60 m.

Una capa de lutita cuya resistividad es de 7.0 Ω·m, con un espesor de 108.7 m.

La última capa cuya resistividad es de 24.1 Ω·m, de arenisca arcillosa.

Foto # N.14. Vista parcial de la zona de estudio del SEV-S.

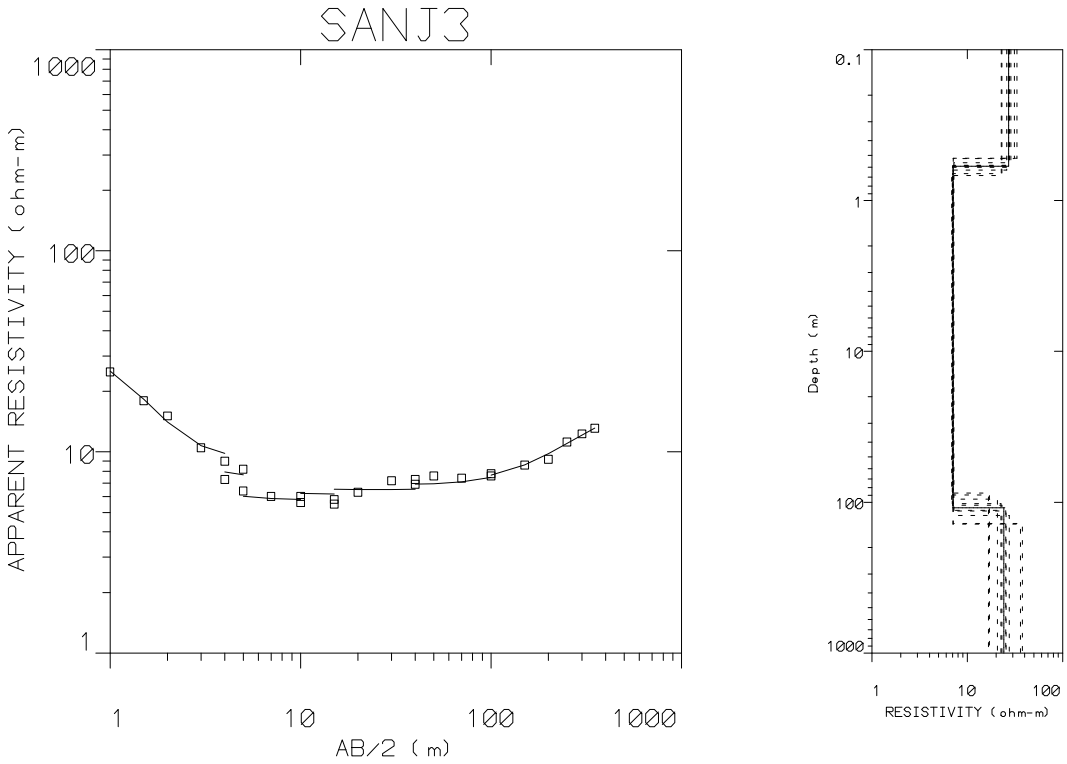


Figura 5.66. Inversión de datos del SEV-S SanJ3.

5.9.2.7 Tomografía SanJ01

Esta tomografía se realizó al NE de la población de La Palma, a 300 metros del SEV-S SanJ3. El dispositivo empleado fue el Wenner, con una separación mínima entre electrodos de 4 metros; la figura 5.67, muestra la disposición de los electrodos en el sitio estudiado. La Inversión de los datos se muestra en la figura 5.68.

Figura 5.67. Disposición de los electrodos en la tomografía SanJ01. Al fondo se observa el manglar del Río Mensabé.

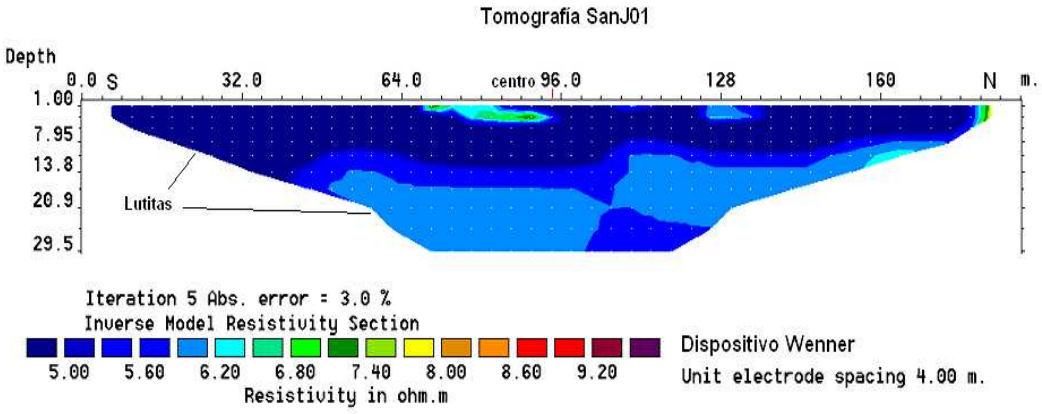


Figura 5.68. Inversión de los datos de resistividad en la tomografía SanJ01.

Este resultado indica que el paquete de lutitas (5-7 Ω·m) a lo largo del perfil es continuo, con variantes en la parte somera de la tomografía. Estas últimas se deben a la respuesta del drenaje y se observa en la parte central y al final de la misma.

5.9.3 Sondeos geoléctricos del sector de Santo Domingo y áreas vecinas

En el sector de Santo Domingo se interpretaron cinco (5) sondeos eléctricos Offset Wenner (SEV-OW) y tres tomografías (ERT). Para ello se aprovechó la información geológica disponible en el área. En este sentido, se tomaron como representativos los sondeos mecánicos 110, 113, 114, 115 y el 125, descritos en el anexo 3.

La distribución de los puntos de medición se presenta en la figura 5.69. En general la zona está constituida por rocas de origen volcánico, que afloran fuertemente alteradas y una cobertura de arcilla arenosa.

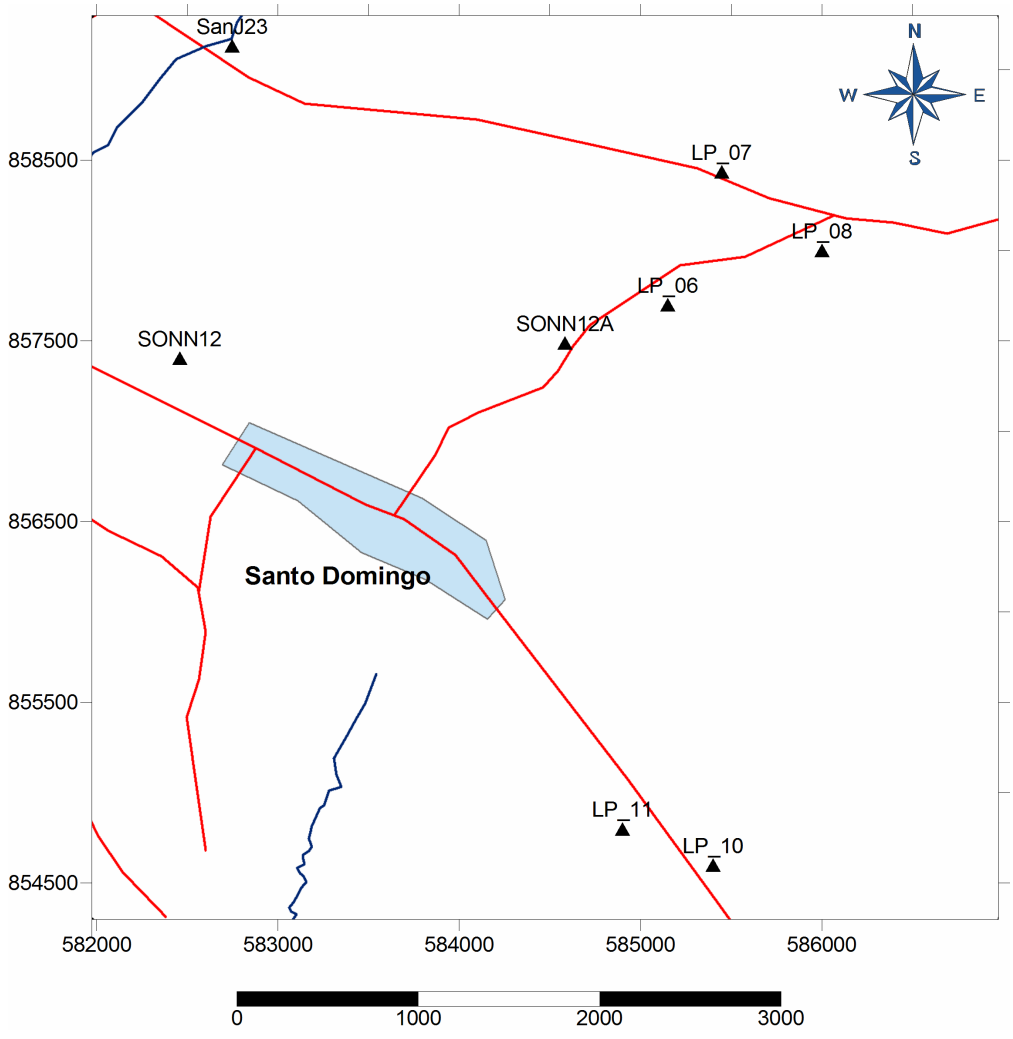


Figura 5.69. Localización y distribución de los sondeos geolectricos realizados en el sector de la Palma.

5.9.3.1 SEV-OW LP_06.

Este sondeo se realizó hacia el sector NE de Santo Domingo, en el camino hacia El Uverito. La zona esta influenciada por los derrubios del Cerro Teta y en todo el ámbito se observan fragmentos de roca andesítica. La inversión de los datos se muestra en la figura 5.70.

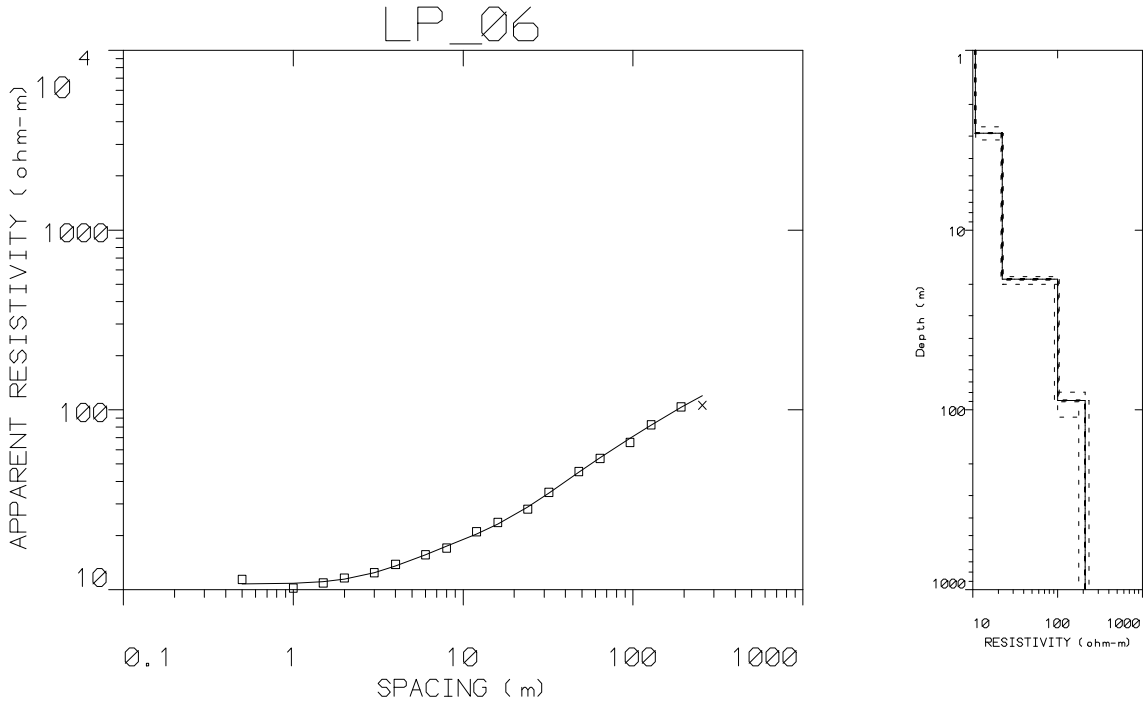


Figura 5.70. Inversión de los datos del SEV-OW LP_06.

Los resultados de esta inversión se interpretan de la manera siguiente:

Una capa de suelo arcilloso con una resistividad de 10.7 Ω·m y un espesor de 2.9 m.

Una capa de arcilla arenosa cuya resistividad es de 22.2 Ω·m y su espesor de 15.9 m.

Una capa es de andesita alterada cuya resistividad es de 100.3 Ω·m con un espesor de 70 metros.

La última capa es de andesita con una resistividad de 210 Ω·m.

5.9.3.2 SEV-OW LP_08.

Este sondeo se realizó hacia el sector NE de Santo Domingo, próximo al cruce con el camino hacia El Uverito. La geología del sector es similar a la del

SEV-OW LP_06 discutido anteriormente. La inversión de los datos se muestra en la figura 5.71.

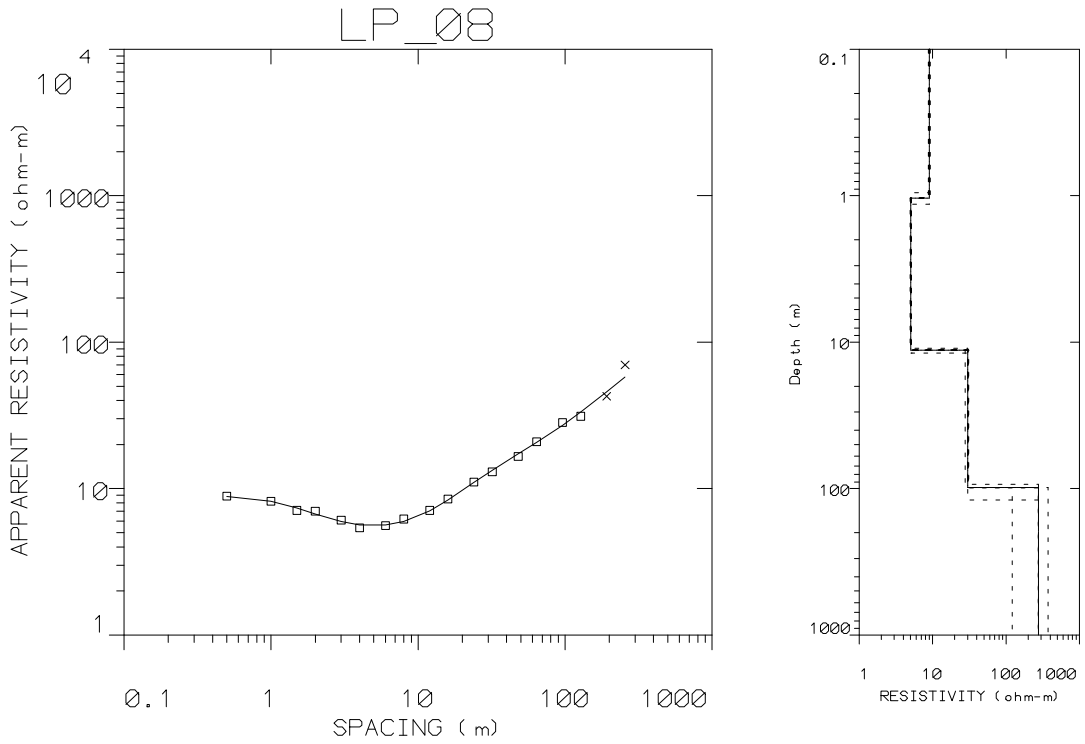


Figura 5.71. Inversión de los datos del SEV-OW LP_08.

Esta inversión se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno-arcilloso con una resistividad de 9 Ω·m y un espesor de 1.0 m.

Una capa de arcilla cuya resistividad es de 5.3 Ω·m y su espesor de 12.0 m.

Una capa de arenisca arcillosa cuyo espesor es de 55.0 m con una resistividad de 30.0 Ω·m.

La última capa es de andesita alterada con una resistividad de 180.0 Ω·m.

5.9.3.3 SEV-OW LP_07.

Este sondeo se realizó hacia el sector NE de Santo Domingo, en el camino a Las Tablas desde El Uverito, próximo al cruce con el camino hacia Santo Domingo. La geología del sector es similar a la del SEV-OW LP_06 discutida anteriormente. La inversión de los datos se muestra en la figura 5.72.

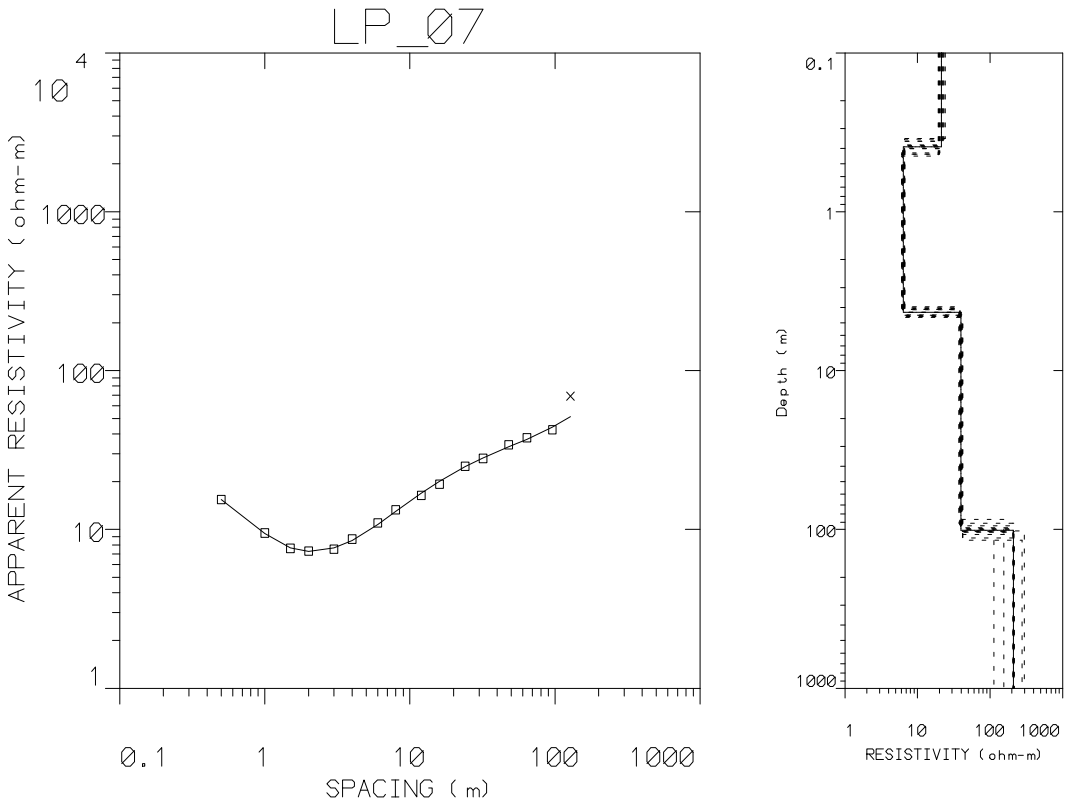


Figura 5.72. Inversión de datos del SEV-OW LP_07.

Esta inversión se interpreta como sigue:

Una capa de suelo areno-arcilloso con una resistividad de 20.5 Ω·m y un espesor de 0.4 m.

Una capa de arcilla cuya resistividad es de 6.1 Ω·m y su espesor de 3.2 m.

Una capa de arenisca cuyo espesor es de 43.6 m con una resistividad de 30.1 Ω·m.

La última capa es de andesita basáltica alterada con una resistividad de 200.0 Ω·m.

5.9.3.4 SEV-OW LP_11.

Este sondeo se realizó a 2.5 Km hacia el SE de Santo Domingo. La geología del sector está constituida por material sedimentario y de derrubio de los cerros próximos al área; más al Sur, se observan algunos estratos, sobretodo en la zona próxima al Río Mensabé. La inversión de los datos se muestra en la figura 5.73.

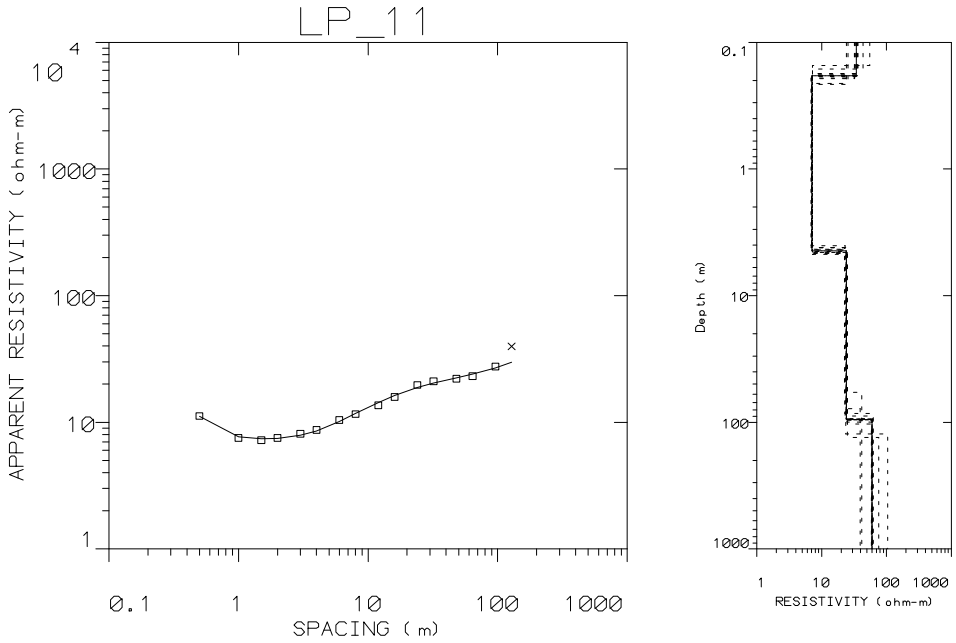


Figura 5.73. Inversión de los datos del SEV-OW LP_11.

Esta inversión se interpreta como sigue:

Una capa de suelo areno-arcilloso con una resistividad de 34.4 Ω·m y un espesor de 0.2 m.

Una capa de lutitas cuya resistividad es de 7.1 Ω·m y su espesor de 4.2 m.

Una capa de arenisca arcillosa cuyo espesor es de 90.8 m con una resistividad de 24.0 Ω·m.

La última capa es de andesita alterada con una resistividad de 60 Ω·m.

5.9.3.5 SEV-OW LP_10.

Este sondeo se realizó a 2.5 Km hacia el SE de Santo Domingo. La geología del sector está constituida por material de derrubio de los cerros próximos al área; más al Sur, se observan algunos estratos, sobretodo en la zona próxima al Río Mensabé. La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.74.

Esta inversión se interpreta como sigue:

Una capa de suelo areno-arcilloso con una resistividad de 36.6 Ω·m y un espesor de 0.2 m.

Una capa de lutita cuya resistividad es de 5.1 Ω·m y su espesor de 12.2 m.

Una capa de arcilla arenosa cuyo espesor es de 16.1 m con una resistividad de 9.8 Ω·m.

La última capa es de lutita con una resistividad de 5.8 Ω·m.

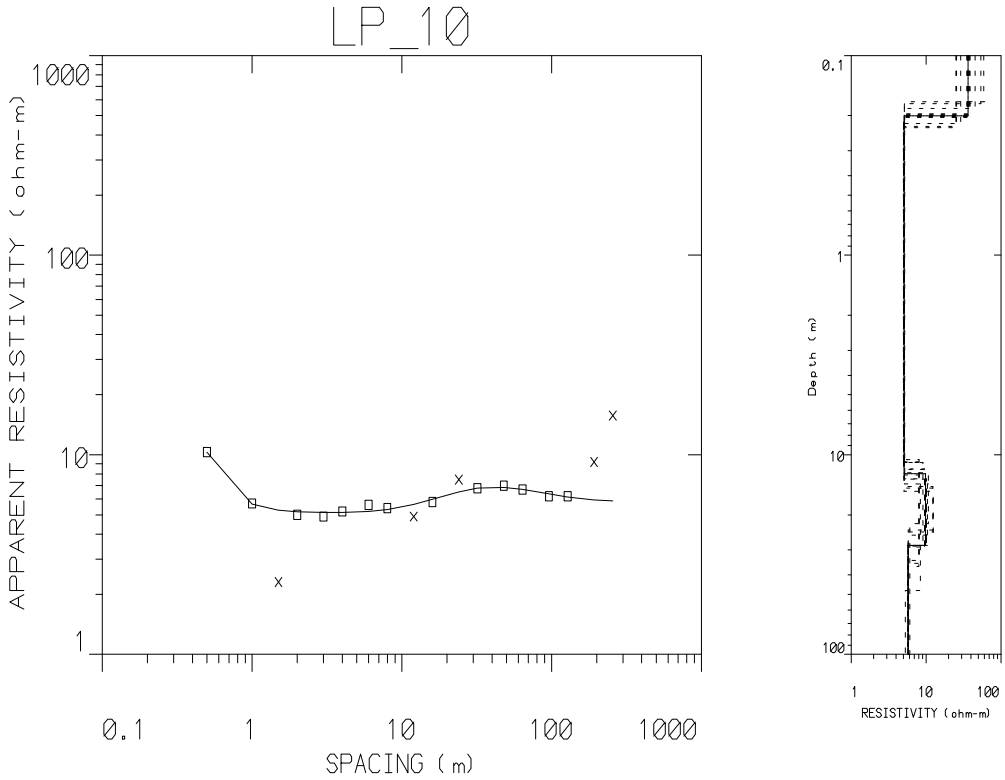


Figura 5.74. Inversión de los datos del SEV-OW LP_10. La proximidad en el valor de la resistividad de las capas crea inestabilidad en el ajuste por inversión.

Estos parámetros ajustan el conjunto de datos y aseguran una convergencia óptima en la inversión, sin embargo, la interpretación que se le puede dar a todo el paquete es que se trata de un grueso estrato de lutita.

5.9.3.6 Tomografía SONN12.

Esta tomografía se realizó 3 km al N de Santo Domingo, la topografía es plana y está al pie del Cerro Paseo Tablado que divide la vertiente de las aguas en la zona y es donde nace la Quebrada Las Cocobolas, hacia donde drenan las aguas de escorrentía. En el área se observan bloques de aglomerados andesíticos y horizontes arcillo arenosos. En la Figura 5.75, se aprecia la orientación de los dispositivos empleados (a). Obsérvese la amplia zona de derrubios en la misma (b). La inversión de datos obtenida con el dispositivo Wenner se muestra en la Figura 5.76.

Figura 5.75. a) Disposición de los electrodos en la Tomografía SONN12. b). Bloques de aglomerado andesítico distribuidos en el área.

Estos resultados indican que los primeros cinco (5) metros están constituidos por una arcilla con una resistividad de 5 Ω·m. Debajo de este horizonte, le sigue una capa de material de derrubio alterado con un espesor variable a lo largo del perfil entre 3 y 4 metros y resistividades que van de 5 a 51 Ω·m.

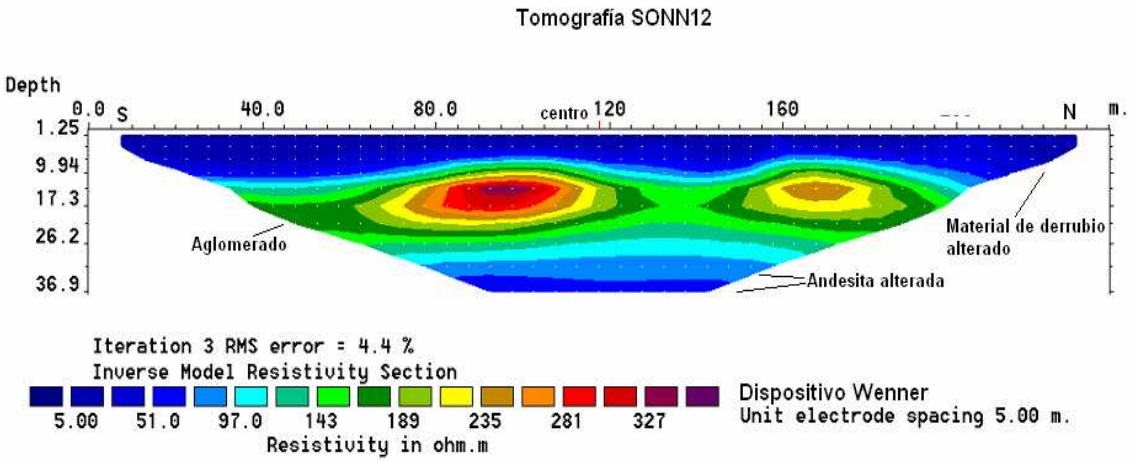


Figura 5.76. Inversión de datos de la tomografía SONN12, obsérvese entre los 120 y 160 metros el cambio en la resistividad, lo que está indicando una zona de fracturas.

A partir de los nueve metros de profundidad, se observa la influencia del aglomerado (>143 Ω·m), alcanzando una profundidad de 30 metros.

La inversión de los datos muestra que esta roca está conservada en algunos segmentos del perfil. Sin embargo, en aquellos sectores en los cuales se observa una disminución de la resistividad, como en el intervalo 120-160 m, se puede establecer una zona de fracturas en profundidad.

Debajo del paquete aglomerático, a los 30 metros de profundidad, se observa una disminución de la resistividad a 97 Ω·m, lo que de acuerdo a la perforación más cercana (pozo No. 125), corresponde a la andesita alterada.

5.9.3.7 Tomografía SONN12A.

Esta Tomografía se realizó en la zona de confluencia de los Cerros Teta y De Las Yeguas, constituidos por andesítas. En el área se aprecia un fuerte drenaje y abundante material de derrubio; este último muy alterado. En la Figura 5.77, se aprecia la disposición de los electrodos a lo largo del perfil.

Figura 5.77. Disposición de los electrodos en la Tomografía SONN12A, nótese al fondo a la derecha el drenaje.

La inversión de los datos de campos muestra en la Figura 5.78. Esta indica que los primeros 7 metros están constituidos por material de derrubio alterado con resistividades del orden de 5 a 45 Ω·m. Esta distribución es variable a lo largo del perfil.

Debajo de este horizonte de roca alterada, se encuentra la andesita fracturada y alterada, cuya resistividad oscila entre 85 y 305 Ω·m; el espesor de esta capa es de 29.9 metros, aproximadamente. A 500 metros del sitio de la tomografía se realizó el sondeo mecánico nº 110, cuyo rendimiento es de 4.3 L/s.

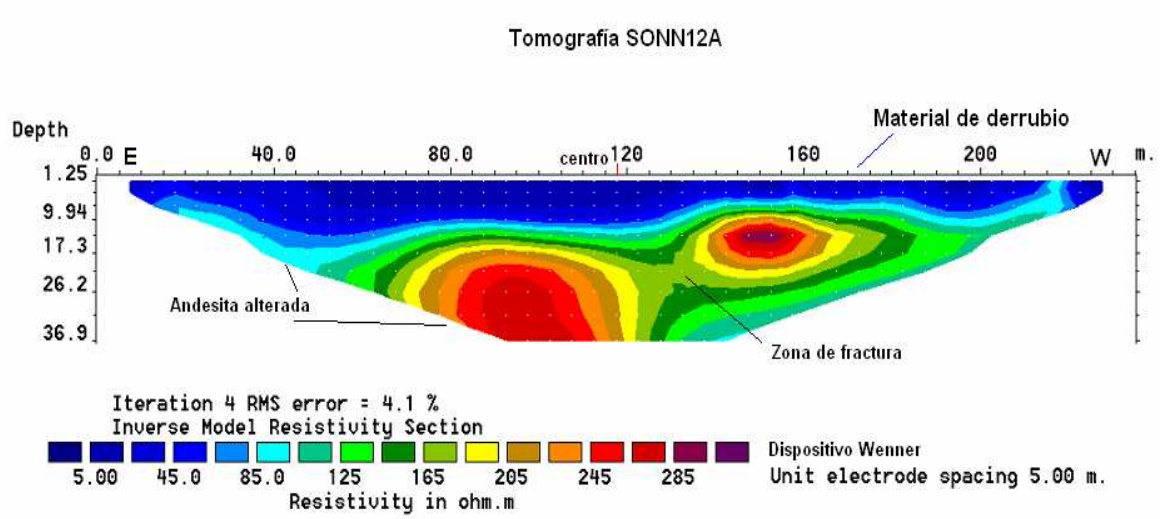


Figura 5.78. Interpretación de la Tomografía SONN12A, nótese hacia la zona central la disminución de la resistividad por efecto de la fractura del terreno.

5.9.3.8 Tomografía SanJ23.

Esta tomografía se realizó al NE de la Población de Santo Domingo, en el camino al Uverito vía Las tablas. La zona está cubierta de suelo arcillo-arenoso de coloración pardusca. Es un terreno plano y en el mismo se aprecia un drenaje moderado. En la zona se han realizado sondeos mecánicos en los que se ha identificado andesitas como basamento. La inversión de los datos se presenta en la figura 5.79.

Estos resultados muestran que la zona superior está cubierta por un suelo arcillo-arenoso de unos 10 metros de espesor, medidos desde la superficie, con resistividades que van de 5 a 26 Ω·m. Debajo de este paquete arcilloso hay arenisca arcillosa con resistividades en el rango de 47 a 110 Ω·m, su espesor está entre 3 y 4 metros.

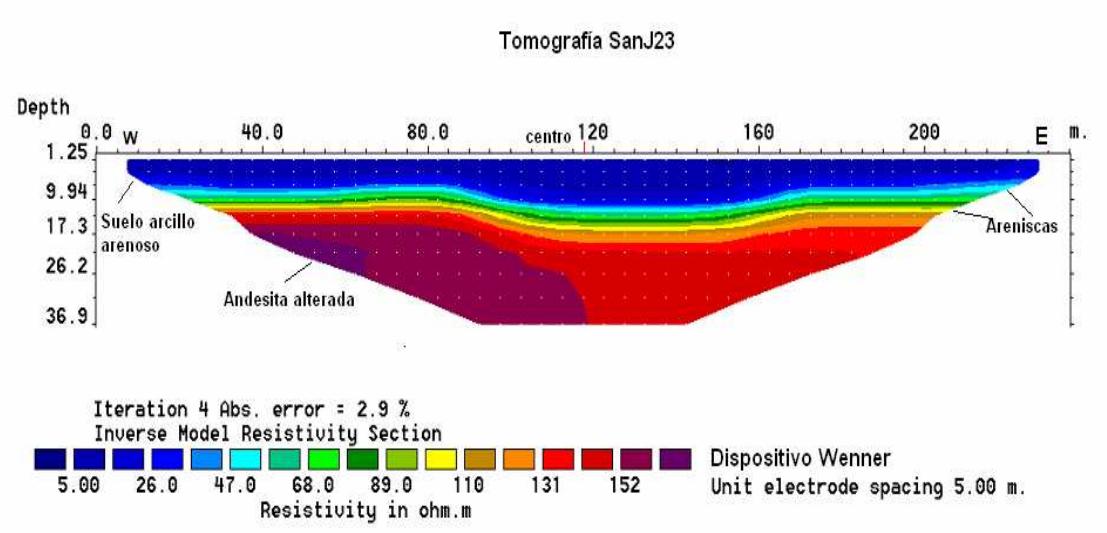


Figura 5.79. Inversión de los datos de la tomografía SanJ23. Obsérvese al W la andesita alterada.

Hacia el W se observa la respuesta de la roca andesita alterada con resistividades del orden 131 a 173 Ω·m. La zona forma parte del límite de una cuenca sedimentaría pequeña que existe en este sector, constituida principalmente por arcillas arenosas y areniscas. En este caso se observa que la tomografía permite una resolución de la capa de arenisca existente y que probablemente sirve de acuífero en la zona.

5.9.4 Sondeos Geoléctricos del Sector de Las Tablas y áreas vecinas

En el sector de Las Tablas se interpretaron cinco (5) sondeos eléctricos Offset Wenner (SEV-OW), seis (6) sondeos eléctricos Schlumberger y tres tomografías (ERT). Para ello se aprovecho la información geológica disponible en el área. En este sentido, se tomaron como representativos los sondeos mecánicos que están descritos en el anexo 4.

Los sondeos geoeléctricos están localizados de acuerdo al mapa de la Figura 5.80.

La zona en general está constituida por rocas de origen volcánico y sedimentario. Las primeras afloran fuertemente alteradas y en general están bajo una cobertura de arcillo arenosa.

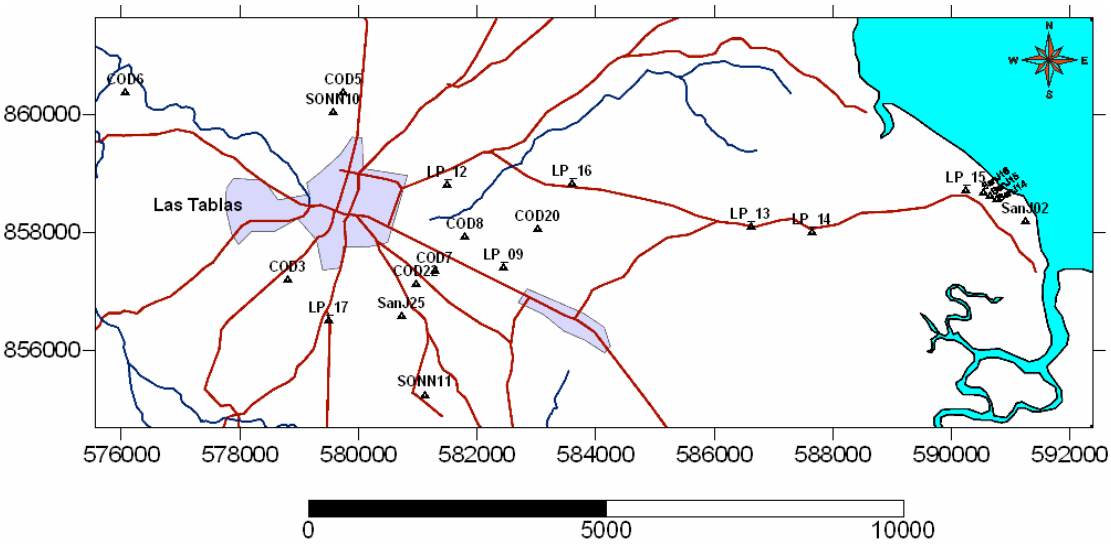


Figura 5.80. Localización y distribución de los sondeos geoléctricos realizados en el sector de Las Tablas.

5.9.4.1 SEV-S COD3.

Este sondeo se realizó hacia el sector SW de Las Tablas en la población de La Tiza. La zona está constituida por arcillas arenosas de coloración parda, se observan fragmentos de roca alterada en todo el sector. La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.81, estos resultados están correlacionados con el sondeo mecánico No. 96.

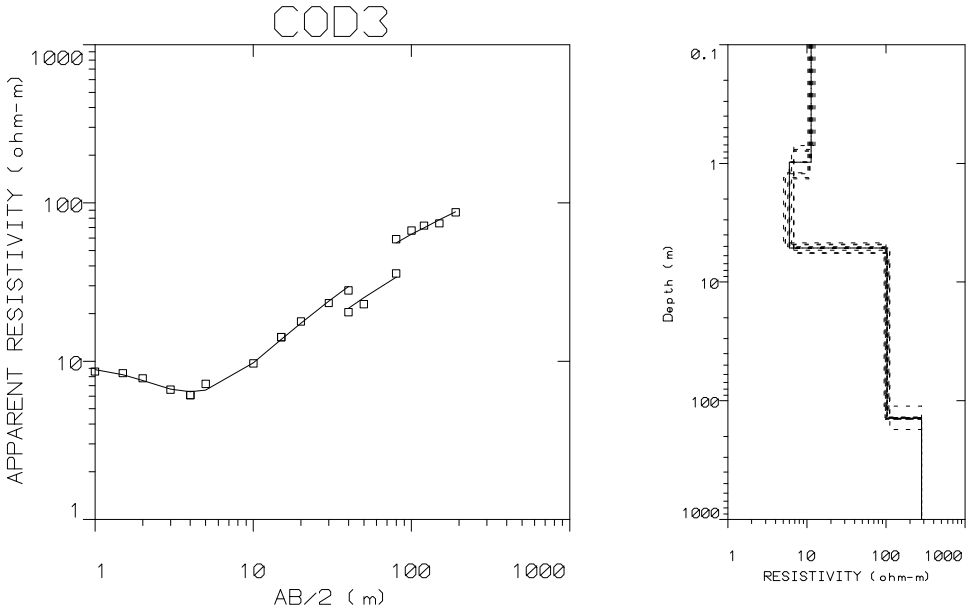


Figura 5.81. Inversión de los datos del SEV-S COD3.

Esta inversión se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno-arcilloso con una resistividad de 11.2 Ω·m y un espesor de 0.98 m.

Una capa de arcilla cuya resistividad es de 6.0 Ω·m y su espesor de 4.2 m.

Una capa de andesita alterada cuyo espesor es de 135 m con una resistividad de 103 Ω·m.

La última capa es de andesitas con una resistividad de 280 Ω·m.

5.9.4.2 SEV-S COD6.

Este sondeo se realizó hacia el sector NW de Las Tablas en la población de Perales, en las proximidades del Río perales. La zona está constituida por sedimentos arcillosos de coloración parda. La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.82, resultados que están correlacionados con el sondeo mecánico No. 32.

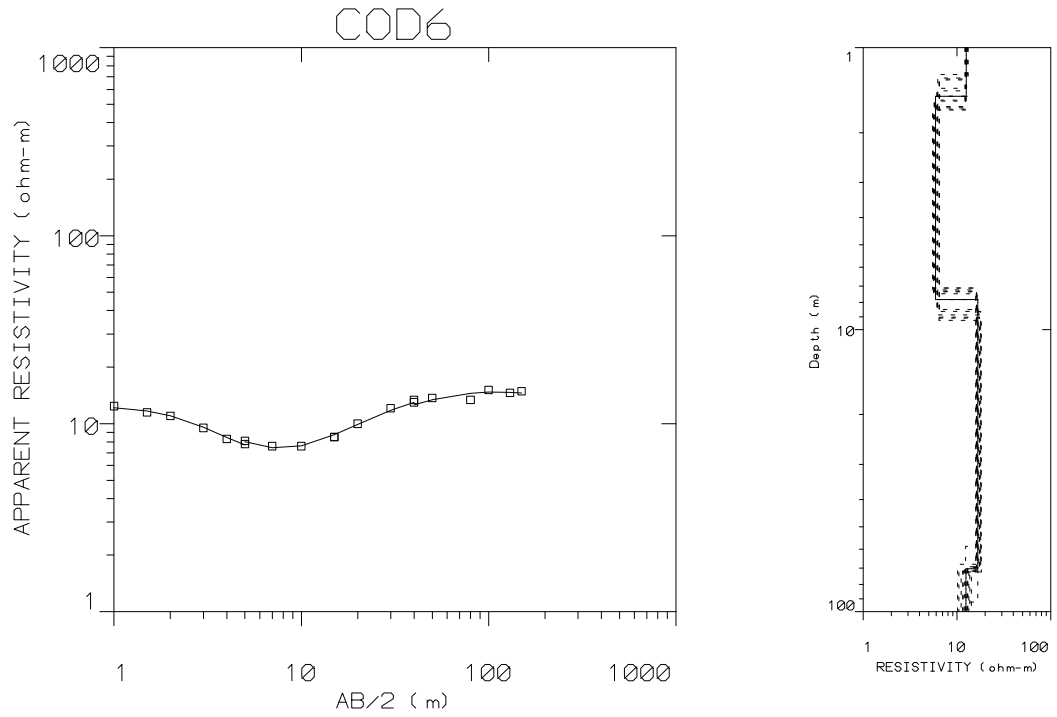


Figura 5.82. Inversión de los datos del SEV-S COD6.

Esta inversión se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno-arcilloso con una resistividad de 12.5 Ω·m y un espesor de 1.5 m.

Una capa de arcilla cuya resistividad es de 5.9 Ω·m y su espesor de 6.3 m.

Una capa de arenisca lutítica cuyo espesor es de 62.5 m con una resistividad de 16.7 Ω·m.

La última capa es de arcillas con una resistividad de 12.4 Ω·m.

5.9.4.3 SEV-S COD5.

Este sondeo se realizó dos (2) Kilómetros al N de Las Tablas en el Barrio de La Petaluna. La zona está constituida por sedimentos arcillosos de coloración parda a rojiza y en la misma se han ensayado algunos sondeos mecánicos en los que se han encontrado andesitas y aglomerados. La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.83, resultados que están correlacionados con los sondeos mecánicos No. 7, 44 y 72.

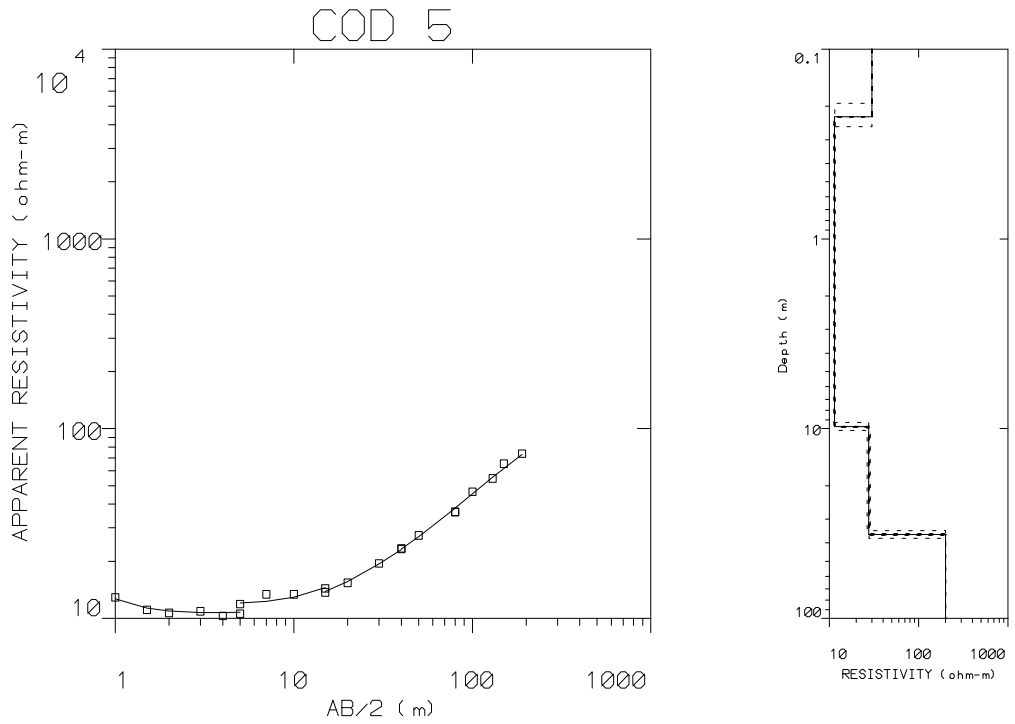


Figura 5.83. Interpretación del SEV-S COD5, en el sector de La Petaluna.

La inversión de los datos se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo con una resistividad de 41.3 Ω·m y un espesor de 0.2 m.

Una capa de arcilla cuya resistividad es de 11.6 Ω·m y su espesor de 12.3 m.

Una capa de andesita alterada cuyo espesor es de 41.0 m con una resistividad de 43.7 Ω·m.

La última capa es de andesitas con una resistividad de 280 Ω·m.

5.9.4.4 SEV-S COD8.

Este sondeo se realizó dos (2) Kilómetros al NE de Las Tablas Camino a Santo Domingo. La zona está constituida por un suelo de coloración parda a rojiza y en la misma se han ensayado algunos sondeos mecánicos en los que se han encontrado andesitas y aglomerados volcánicos. La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.84, resultados que están correlacionados con los sondeos mecánicos No. 17 y 36.

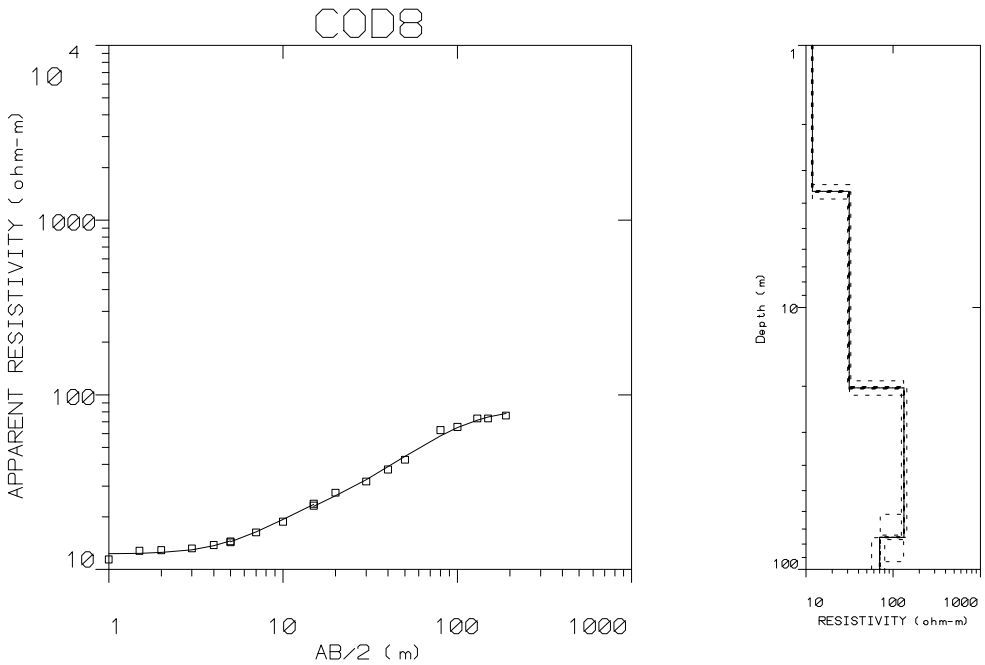


Figura 5.84. Inversión de datos del SEV-S COD8.

La inversión de los datos se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo con una resistividad de 11.8 Ω·m cuyo espesor es de 3.6 m.

Una capa de aglomerado alterado cuya resistividad es de 31.4 Ω·m y su espesor de 16.5 m.

Una capa de aglomerado cuyo espesor es de 55.1 m con una resistividad de 132.6 Ω·m.

La última capa es de andesita alterada con una resistividad de 70.2 Ω·m

5.9.4.5 SEV-S COD7.

Este sondeo se realizó dos (2) Kilómetros al SE de Las Tablas en el barrio de Santa Isabel. La zona está constituida por un suelo de coloración parda a rojiza; en la que se han realizado algunos sondeos mecánicos, en los que se han identificado andesitas y aglomerados volcánicos. La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.85, resultados que están correlacionados con los sondeos mecánicos No. 27 y 53.

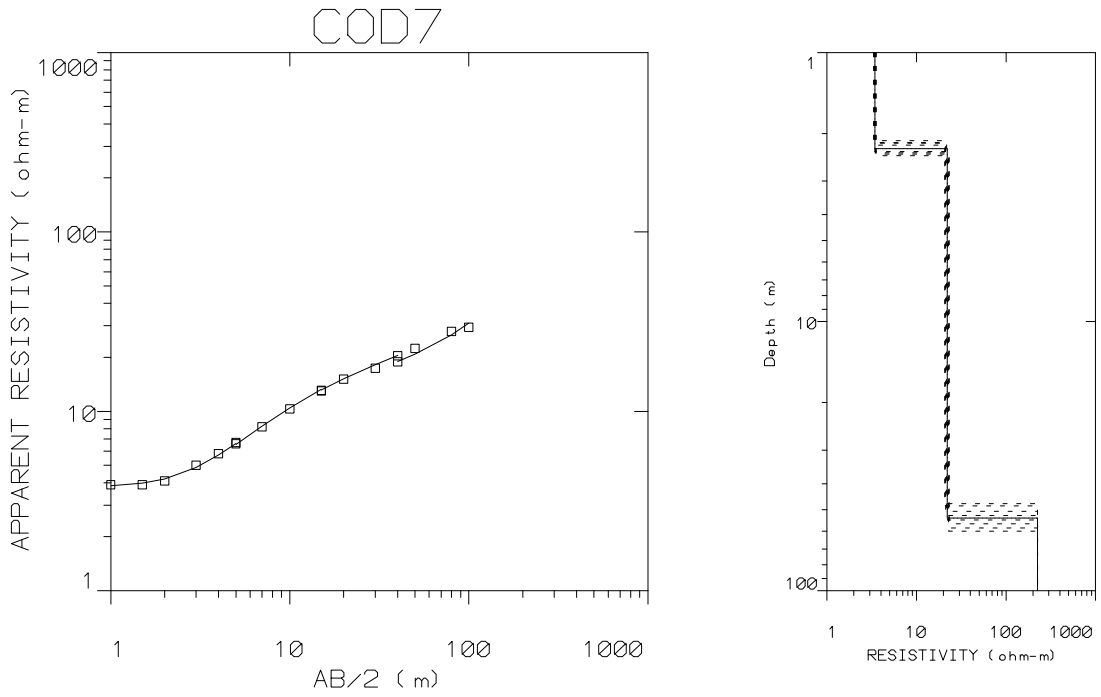


Figura 5.85. Inversión de los datos del SEV-S COD7.

El resultado de la inversión se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo arcilloso con una resistividad de 3.4 Ω·m con un espesor es de 2.3 m.

Una capa de aglomerado alterado cuya resistividad es de 22.0 Ω·m con un espesor de 53.6 m.

La última capa es de andesita con una resistividad de 225 Ω·m.

5.9.4.6 SEV-S COD22.

Este sondeo se realizó dos (2.5) Kilómetros al SE de Las Tablas en el barrio de Santa Isabel. La zona está constituida por un suelo de coloración parda; en la que se han realizado algunos sondeos mecánicos, en los que se han identificado arcillas, lutitas y arenisca arcillosa. La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.86, resultados que están correlacionados con los sondeos mecánicos No. 50 y 51.

El resultado de la inversión se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno arcilloso con una resistividad de 30.0 Ω·m con un espesor de 1.9 m.

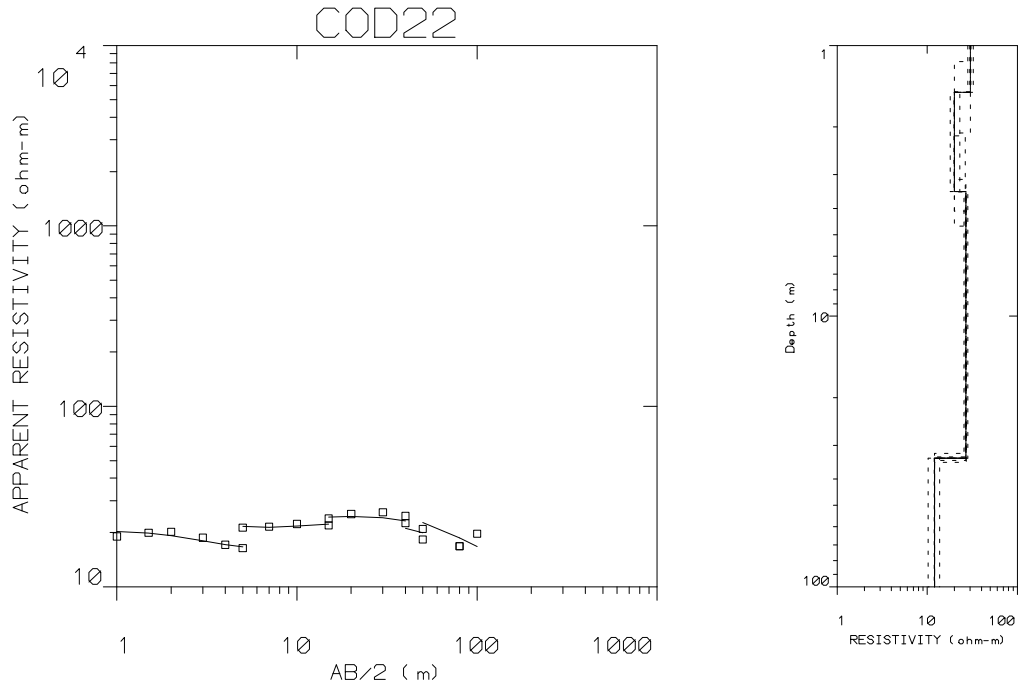


Figura 5.86. Inversión de los datos del SEV-S COD22.

Una capa de arcilla con una resistividad es de 20.0 Ω·m y un espesor de 2.0 m.

Una capa de arenisca arcillosa con resistividad de 26 Ω·m y un espesor de 30 m.

La última capa es de lutitas con una resistividad de 12.0 Ω·m

5.9.4.7 SEV-OW LP_09.

Este sondeo se realizó a 3.0 Kilómetros al ESE de Las Tablas, en dirección a la población de Santo Domingo; en esta zona se realizó la tomografía SONN12. La misma está constituida por un suelo areno arcilloso de coloración parda; en el sector se han realizado algunos sondeos mecánicos, en los que se han identificado aglomerados y andesitas.

La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.87, resultados que están correlacionados con el sondeo mecánico No. 125.

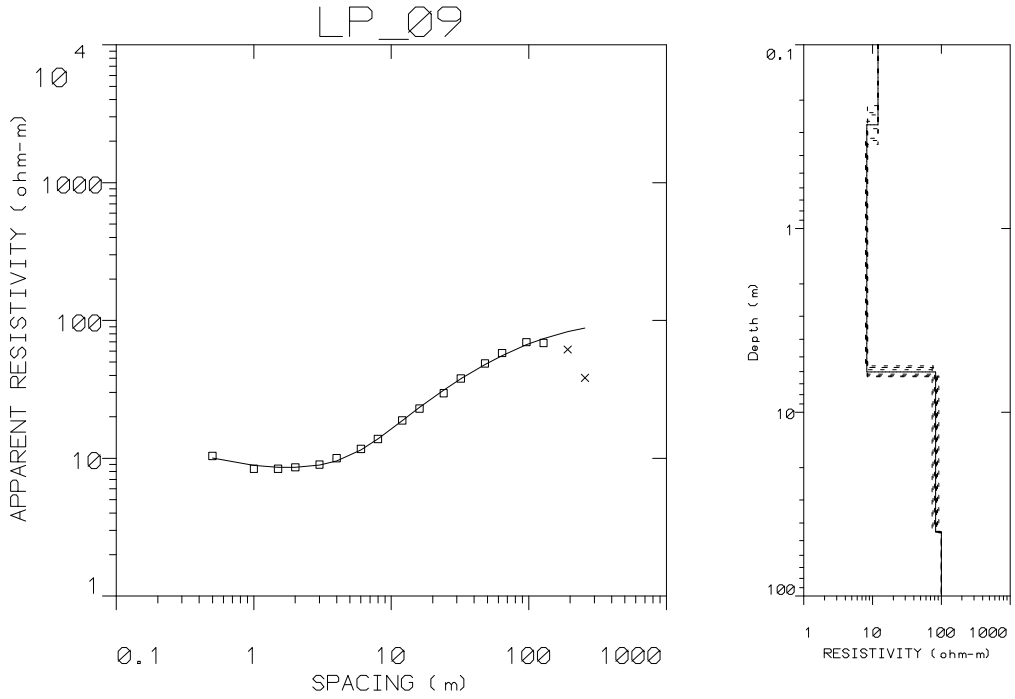


Figura 5.87. Inversión de datos del SEV-OW LP_09.

Este resultado se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno arcilloso con una resistividad de 20.0 Ω·m con un espesor es de 0.17 m.

Una capa de arcilla con una resistividad de 8.3 Ω·m y un espesor de 5.8 m.

Una capa de aglomerado alterado con una resistividad de 78.9 Ω·m y un espesor de 80.7 m.

Finalmente una capa de andesitas alteradas cuya resistividad es de 155.0 Ω·m.

5.9.4.8 SEV-OW LP_13.

Este sondeo se realizó 7.1 Kilómetros al E de Las Tablas, en dirección a la Playa El Uverito. La zona está constituida por un suelo de coloración parda y en la misma se han realizado algunos sondeos mecánicos, en los que se han identificado areniscas y andesitas.

La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.88, resultados que están correlacionados con los sondeos mecánicos No. 28 y 128.

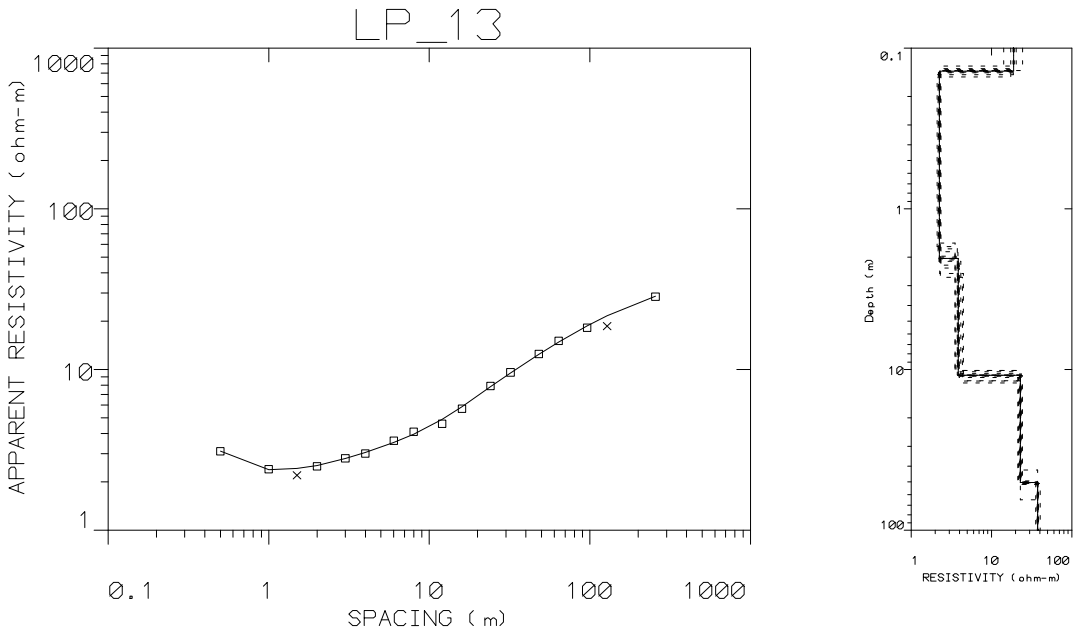


Figura 5.88. Inversión de los datos del SEV-OW LP_13.

Este resultado se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno arcilloso con una resistividad de 18.8 Ω·m y un espesor de 0.20 m.

Una capa de arcilla con una resistividad de 2.2 Ω·m y un espesor de 1.8 m.

Una capa de arcilla arenosa cuyo espesor es de 8.9 metros y una resistividad de 3.9 Ω·m.

Una capa de arenisca arcillosa con resistividad de 22.3 Ω·m y un espesor de 39.6 m.

La última capa es de andesita alterada con una resistividad de 37.7 Ω·m.

5.9.4.9 SEV-OW LP_14.

Este sondeo se realizó 8.0 Kilómetros al E de Las Tablas, en dirección a la Playa El Uverito. La zona está constituida por un suelo de coloración parda y en la misma se han realizado algunos sondeos mecánicos, en los que se han identificado arcillas, arenisca arcillosa y andesitas.

La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.89, resultados que están correlacionados con los sondeos mecánicos No. 28 y 128.

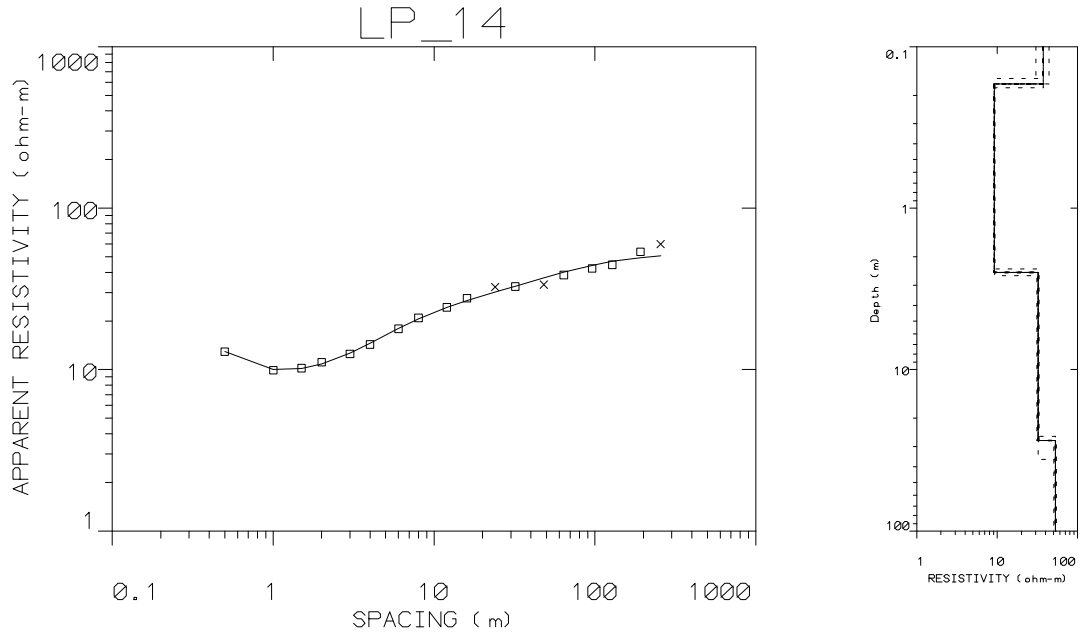


Figura 5.89. Inversión de datos del **SEV-OW LP_14.**

Este resultado se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno arcilloso con una resistividad de 37.2 Ω·m con un espesor es de 0.2 m.

Una capa de arcilla con resistividad de 9.2 Ω·m y un espesor de 2.5 m.

Una capa de arenisca arcillosa de 27.5 m de espesor y una resistividad de 32.2 Ω·m.

La última capa es de andesita alterada con una resistividad de 52.8 Ω·m.

5.9.4.10 SEV-OW LP_15.

Este sondeo se realizó 10.6 Kilómetros al E de Las Tablas, próximo a la Playa El Uverito. La zona está constituida por un suelo de coloración parda y en la misma se han realizado algunos sondeos mecánicos, en los que se han identificado arcillas, arenisca arcillosa y andesitas.

La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.90, estos resultados están correlacionados con los sondeos mecánicos No. 28 y 128.

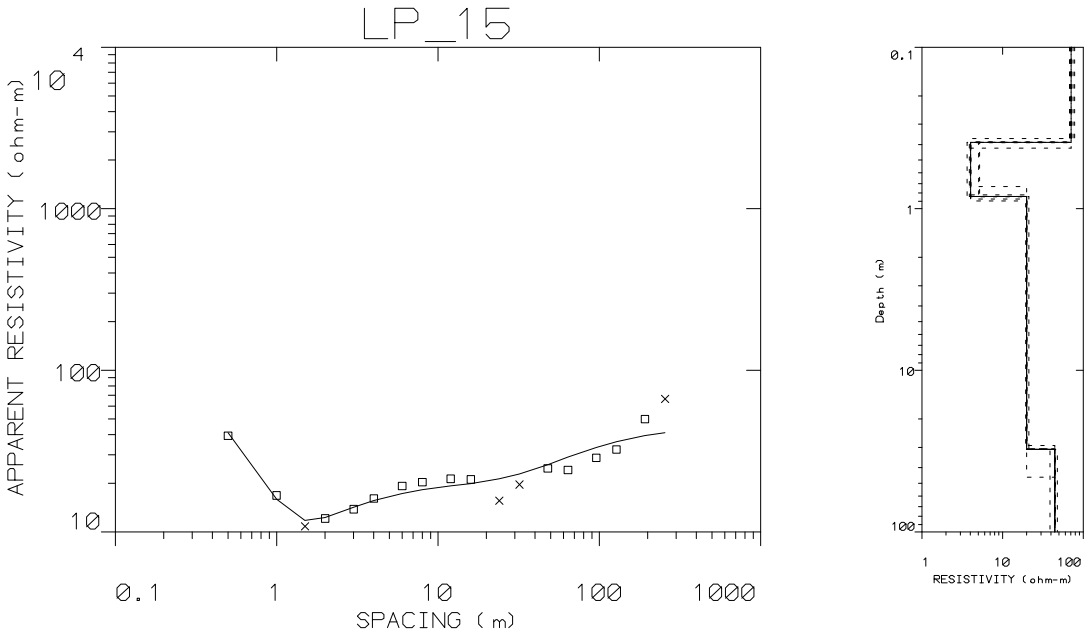


Figura 5.90. Interpretación del sondeo **SEV-OW LP_15.**

Este resultado se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno arcilloso con una resistividad de 71.0 Ω·m con un espesor de 0.4 m.

Una capa de arcilla con una resistividad de 4 Ω·m y un espesor de 0.4 m.

Una capa de arenisca arcillosa con resistividad de 19.9 Ω·m y un espesor de 30 m.

La última capa es de andesitas alterada con una resistividad de 44.6 Ω·m.

5.9.4.11 SEV-OW LP_16.

Este sondeo se realizó 4.5 Kilómetros al ENE de Las Tablas, en dirección a la Playa El Uverito. La zona está constituida por un suelo de coloración parda y en

la misma se han realizado algunos sondeos mecánicos, en los que se han identificado tobas, aglomerados y andesitas.

La inversión de los datos se muestra en la figura 5.91, resultados que están correlacionados con el sondeo mecánico No. 54, 98 y el 99.

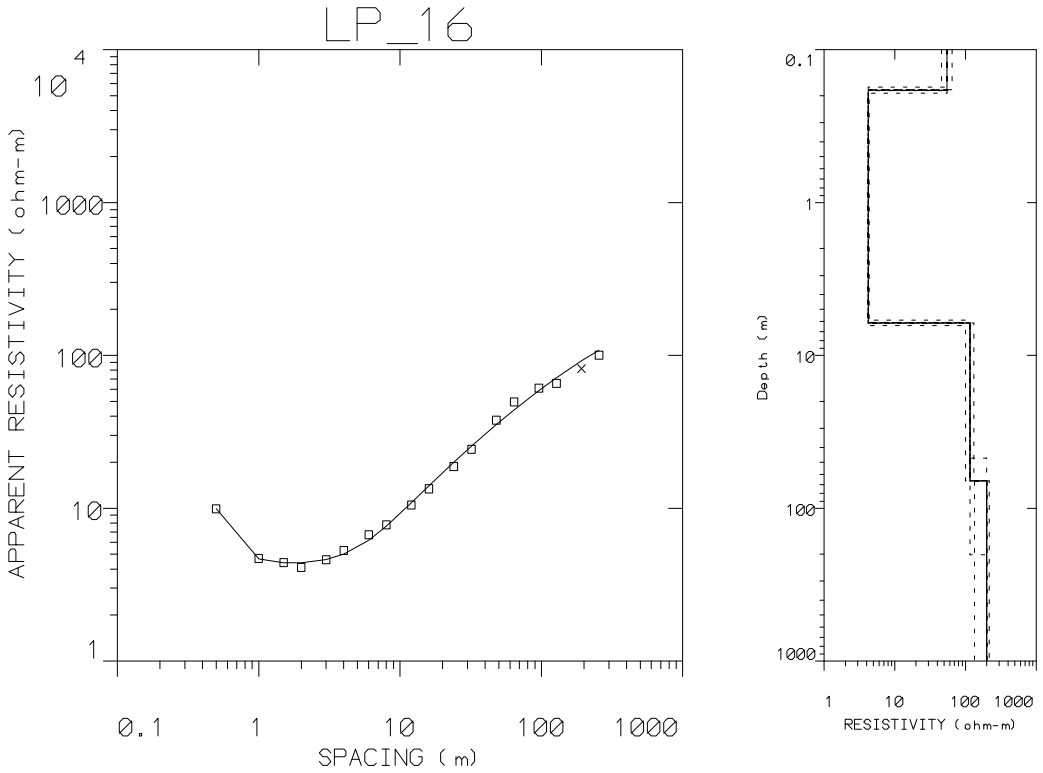


Figura 5.91. Inversión de los datos del SEV-OW LP_16.

Este resultado se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno arcilloso con una resistividad de 55.0 Ω·m con un espesor de 0.2 m.

Una capa de arcilla con resistividad de 4.2 Ω·m y un espesor de 5.9 m.

Una capa toba arcillosa con una resistividad de 116.3Ω·m y un espesor de 60.0 m.

La última capa es de andesita, probablemente alterada con una resistividad de 200.0 Ω·m.

5.9.4.12 SEV-OW LP_12.

Este sondeo geoeléctrico se realizó a 2.0 Km al E de Las Tablas, en el camino a EL Uverito. El área está constituida por un suelo de coloración parda y en la misma se han realizado algunos sondeos mecánicos, en los que se han identificado andesitas.

El resultado de la inversión de los datos se muestra en la Figura 5.92; los que están correlacionados con los sondeos mecánicos No. 62 y 13.

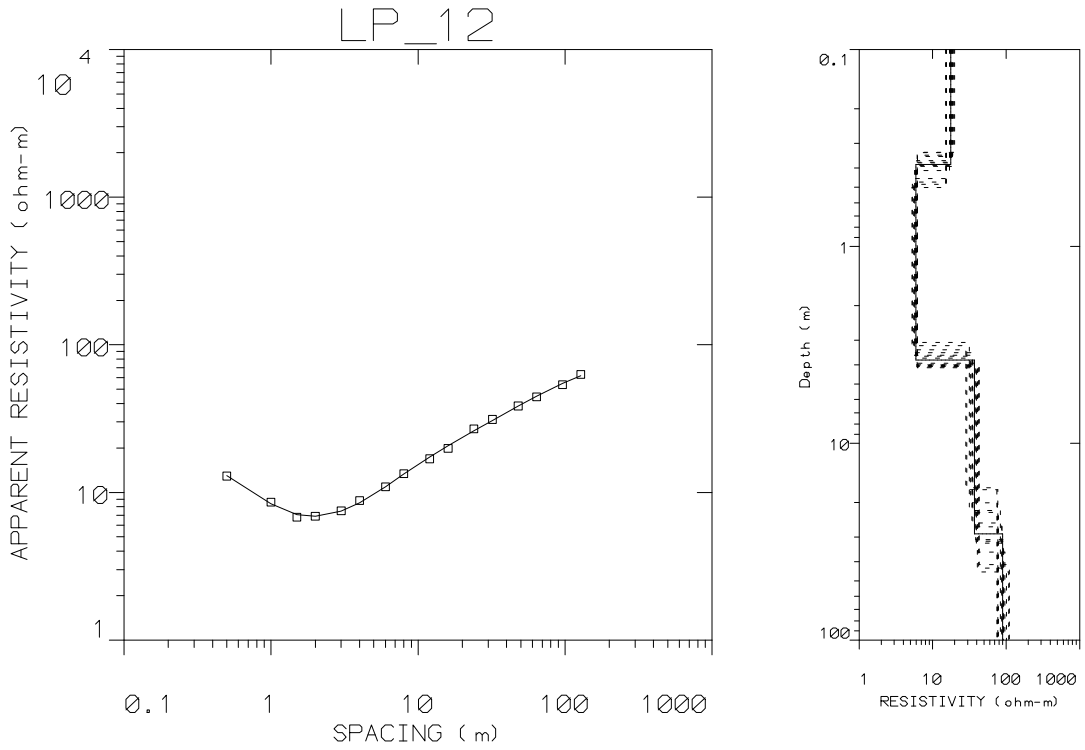


Figura 5.92. Inversión de datos del SEV-OW LP_12.

El resultado de esta inversión se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno arcilloso con una resistividad de 18.4 Ω·m con un espesor de 0.36 m.

Una capa de arcilla cuya resistividad es de 6.1 Ω·m y un espesor de 4.2 m.

Una capa de andesita alterada con resistividad de 46.3 Ω·m y un espesor de 76.2 m.

La última capa es de andesitas con una resistividad de 200.0 Ω·m.

5.9.4.13 SEV-OW LP_17.

Este sondeo se realizó en el sector de El Cocal al Sur de Las Tablas en el camino a Peña Blanca. La zona está constituida por un suelo de coloración parda a rojiza y en la misma se han ensayado algunos sondeos mecánicos en los que se han encontrado andesitas y aglomerados volcánicos.

La inversión de los datos se muestra en la Figura 5.93, resultados que están correlacionados con los sondeos mecánicos No. 65, 103,104, 106 y el 109.

Este resultado se interpreta de la manera siguiente:

Una capa de suelo areno arcilloso con una resistividad de 32.0 Ωm con un espesor de 0.58 m.

Una capa de arcilla con una resistividad de 6.1 Ωm y un espesor de 1.9 m.

Una capa de aglomerado alterado con una resistividad de 66.8 Ωm y un espesor de 25.0 m.

Una capa de aglomerado cuya resistividad es de 170.0 Ωm y cuyo espesor es de 11.5 m.

La última capa es de andesitas con una resistividad de 251.9 Ωm.

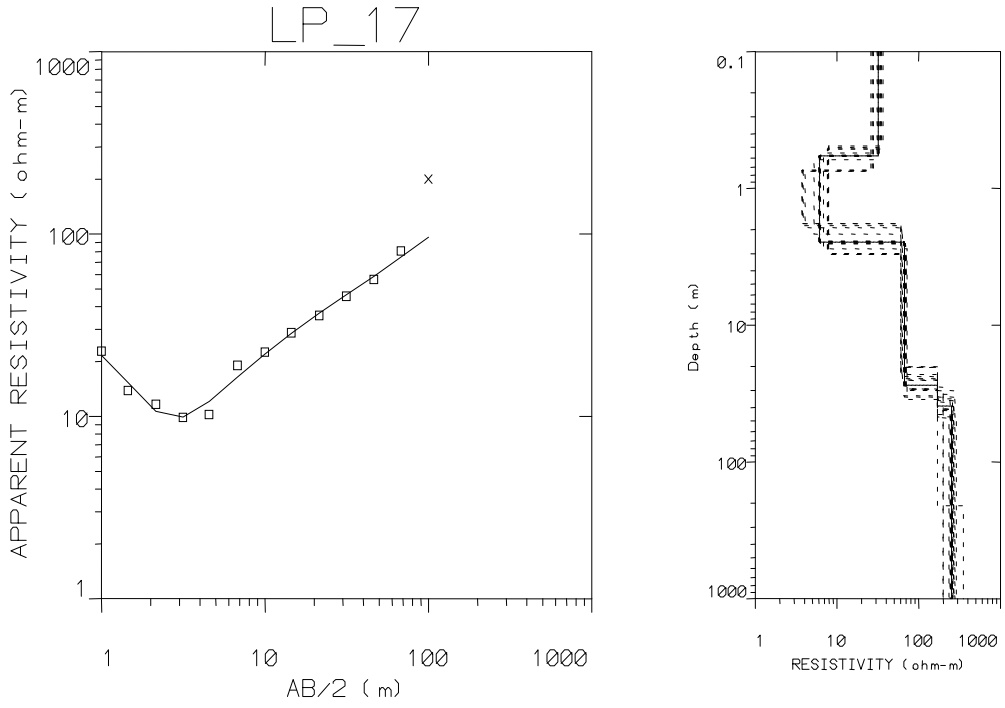


Figura 5.93. Inversión de los datos del sondeo SEV-OW LP_17.

5.9.4.14 Tomografía SONN11.

Esta tomografía se realizó a 3 Km al Sur de Las Tablas, en el sector de Loma Bonita. El punto central se encuentra a 200 metros al E de la Quebrada La Ermita. En los sondeos mecánicos más cercanos a esta zona, se han identificado aglomerados y andesitas (No.6 y 39). Los rendimientos en esta zona son del orden de 1.3 a 8 L/s .

Los datos de la tomografía han sido invertidos mediante la inversión robusta y se presentan en la Figura 5.94. La tomografía se realizó sobre el eje de una fractura paralela al cauce de la quebrada. Sobre la zona, se observa material de derrubio, cuyo espesor no parece ser importante. El área de estudio es un terreno plano y está cubierta de suelo areno-arcilloso de coloración parda (5 a 12.8 Ω·m). Debajo de este horizonte se identifica una zona de saturación con resistividades que van de 12.8 a 32.8 Ω·m.

Hacia el centro de la tomografía, sobre la fractura, se observa que la roca alterada tiene un espesor mayor (5-7 m), que es en donde precisamente, se han obtenido los rendimientos indicados; la resistividad varía de 32.8 a 84 Ω·m. Es probable que este horizonte de aglomerado alterado, durante la época lluviosa, se recargue desde la Quebrada La Ermita. Debajo de este horizonte está el aglomerado (84-170 Ω·m), que por las evidencias superficiales, próximo a la zona de las fracturas, puede estar fracturado a profundidades de 20-30 metros. En la Figura 5.95, se observa una imagen parcial del área en estudio.

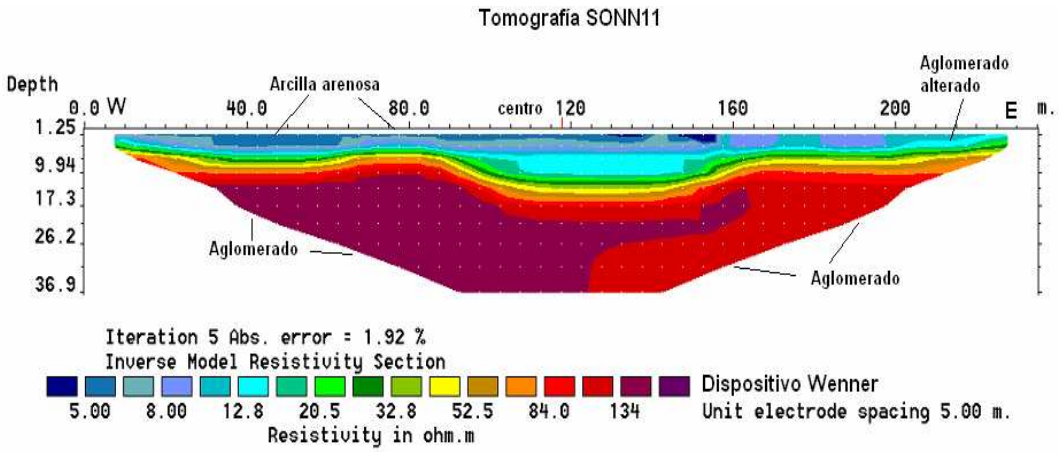


Figura 5.94. Inversión de los datos de la tomografía SONN11. Obsérvese el horizonte de aglomerado alterado a los siete metros de profundidad.

Figura 5.95. Disposición de la tomografía. A la Izquierda se observa uno de los pozos en explotación para uso particular.

5.9.4.15 Tomografía SanJ25.

Esta tomografía se realizó a 2.4 Km al Sur de Las Tablas, camino al sector de Loma Bonita; el punto central se encuentra a 300 metros al E de la Quebrada La Ermita. Los sondeos mecánicos realizados y descritos más cercanos a esta zona, han identificado aglomerados y andesitas (No.6 y No. 39). Este sondeo geoléctrico se hizo como una continuación al análisis de la fractura o alineamiento estudiado en la tomografía SONN11.

Los datos invertidos se presentan en la Figura 5.96. La Tomografía se realizó sobre el eje de una fractura paralela al cauce de la quebrada y rellena con material de derrubio arcillo arenoso (5 a 28.6 Ω·m); el espesor de este material alcanza, medidos desde la superficie, unos siete (7) metros. Debajo de este horizonte se encuentra una capa de material saturado (28-52 Ω·m), de naturaleza no determinada; cuyo espesor es de 3-4 metros. Todo parece indicar que se trata de material de derrubio, ya que el mismo aflora a nivel de la quebrada. A partir de los 12 a los 17 metros se observa una capa de material de derrubio el cual tiene una resistividad entre 52-75 Ω·m.

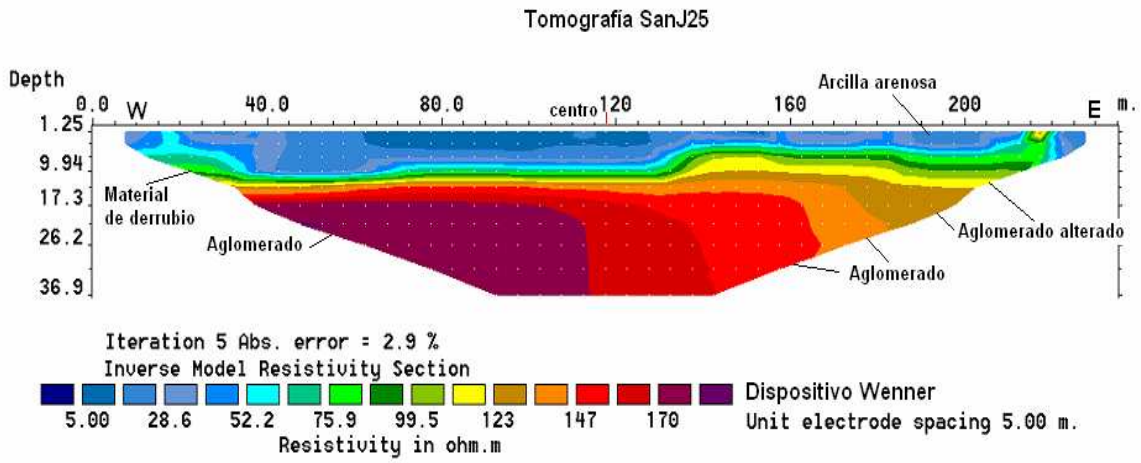


Figura 5.96. Inversión de los datos de la tomografía SanJ25.

A partir de los 17 metros, se observa la respuesta del aglomerado alterado con una resistividad de 99 a 123 Ω·m, el espesor de esta capa es de unos tres (3) metros. Por debajo de este horizonte se encuentra el aglomerado con resistividad que va de 147-190 Ω·m, obsérvese que en la zona central se observa una zona de alteración marcada, no queda claro que esta sea una zona de falla o una zona de contacto, porque no existen afloramientos y motiva este seguimiento el drenaje existente.

5.9.4.16 Tomografía SONN10.

Esta tomografía se realizó próxima a la Barriada Nuevo Méjico, un kilómetro al Norte del centro de Las Tablas, el punto central se localiza sobre un alineamiento que sirve de drenaje durante el periodo de lluvias. El sondeo mecánico más cercano a esta zona es el No. 44 en el que se han identificado alternancias de arcillas, andesitas y aglomerados, estos últimos se encuentran a más de 60 metros de profundidad. En la Figura 5.97, se muestra un panorama del área de estudio.

Foto # 5.97. Vista parcial del área de estudio de la tomografía SONN10. Obsérvese el drenaje típico de la zona.

La superficie del suelo está constituida por un suelo arcillo arenoso de coloración parda a rojiza, además se observan fragmentos de roca alterada en las proximidades del drenaje. A 500 metros, hacia el NE de la zona se observa el Cerro Cerrezuela, que es el punto más alto próximo a Las Tablas, de naturaleza andesítica. La inversión de los datos de la tomografía se presenta en la Figura 5.98.

La inversión de la tomografía se interpreta como sigue:

Una capa de suelo arcilloso con un espesor de hasta diez (10) metros, su resistividad eléctrica tiene un valor de 5-11 Ω·m. Debajo de este horizonte se observa una zona de saturación con una resistividad de 17.2 Ω·m y que al NE varía de 9 a 26 metros de profundidad, en tanto que al SW varía de 9 a10 metros.

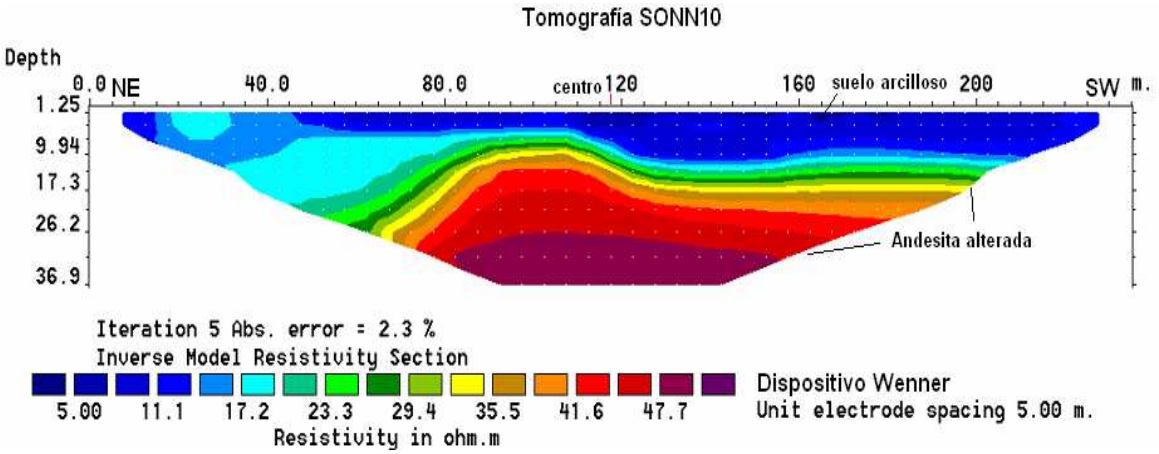


Figura 5.98. Resultado de la inversión de los datos de la tomografía SONN10.

La última capa determinada es de andesita alterada con resistividades que van de 23.3 a 51.5 Ω·m, su espesor varía de NE al SW, siendo más espeso hacia el SW, variando de 17 a 36.9 metros de Profundidad.

Como se observa en la foto de la figura 5.97, el terreno es casi plano, por lo que el drenaje se puede explicar a través del resultado de la inversión. En este sentido, existe una variación de la resistividad en el centro del perfil en dirección SW, lo cual es indicativo del estado de alteración de la roca en ese punto; el cual incluso es más profundo en la zona NE. Es claro que hacia el NE este contraste en las propiedades físicas este actúa como un dique subterráneo.

5.9.4.17 Tomografía SanJ02.

Esta tomografía se realizó a 1 Km del Puerto Mensabé, la misma se realizó perpendicular a la costa, en el camino al Uverito vía Las Tablas. La zona es un terreno plano y está cubierta de suelo areno-arcilloso de coloración parda; en la misma se han realizado algunos sondeos mecánicos, en los que se han identificado areniscas y andesitas. La inversión de los datos se muestra en la figura 5.99, resultados que están correlacionados con los sondeos mecánicos No. 28 y 128.

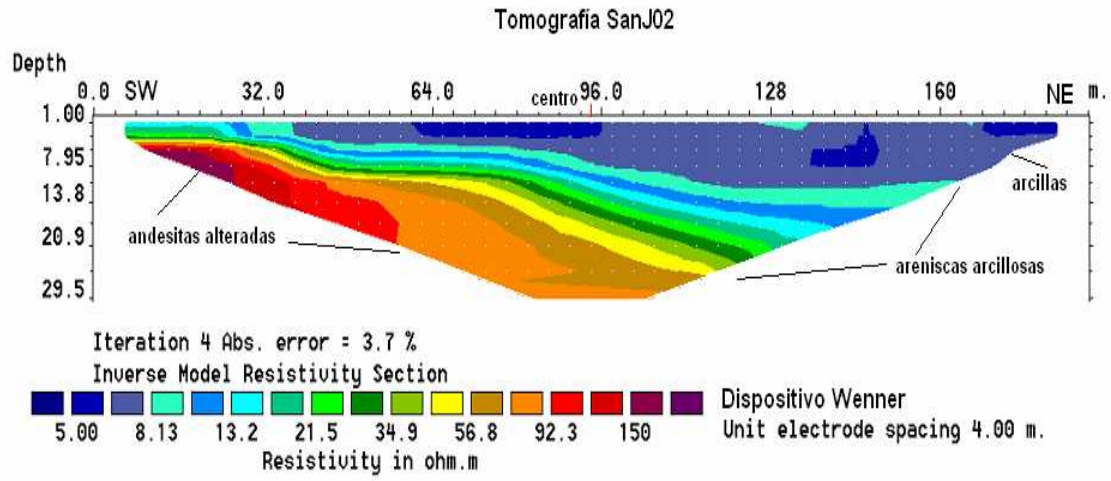


Figura 5.99. Interpretación de la tomografía SanJ02.

De acuerdo al resultado la inversión se puede interpretar de la manera siguiente:

Un paquete de arcillas que va de la parte superior hasta aproximadamente los 8 metros de profundidad, la resistividad de este material está entre 5 y 8.1 Ω·m. Luego, sigue un paquete alternado de areniscas arcillosas con resistividades entre 13.2 y 56.8 Ω·m, la profundidad varia desde los 8 metros hasta los 29.5 m, obsérvese que las capas buzan en dirección NE. Debajo de los horizontes descritos, desde los 8 m de profundidad se observa la andesita alterada con resistividades en el orden de 56 a 185 Ω·m.

5.9.4.18 Tomografía COD20.

Esta tomografía se realizó en el sector de Santa Rita entre el camino a la Playa El Uverito y Santo Domingo. En esta zona, a menos de 100 m, se realizó el sondeo mecánico No.35; en toda la perforación se identificaron rocas de tipo andesítico y aglomerados con un alto grado de alteración. El resultado de la inversión de los datos se presenta en la figura 5.100.

La imagen muestra en la zona superior (primeros 12 metros) que el material constituyente está formado por arcilla arenosa con resistividades del orden de 3.90 a 24.6 Ω·m.

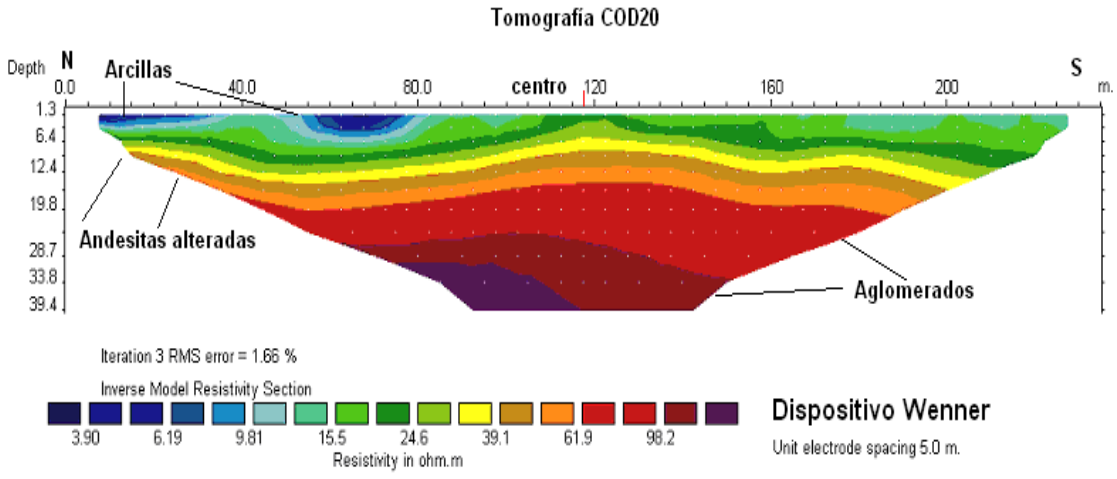


Figura 5.100. Inversión de los datos de la tomografía COD20.

Debajo de este horizonte se identifican las andesitas alteradas con resistividades que van de 39.1 a 61.9 Ω·m, esta capa se encuentra entre los 12.4

y 19.8 metros de profundidad. Entre los 19.8 y 39.4 metros de profundidad se identifica el aglomerado volcánico con resistividades del orden 98.2 y 134.5 Ω·m.

5.9.4.19 Tomografía SanJ03.

Esta tomografía se realizó a 4 Km del Puerto Mensabé y a 2 Km del manglar del Río Mensabé, en el camino al Uverito vía Las Tablas. La zona es un terreno plano y está cubierta de suelo areno-arcilloso de coloración parda; en la misma se han realizado algunos sondeos mecánicos, en los que se han identificado areniscas y andesitas.

La inversión de los datos se muestra en la figura 5.101; por la distribución de las resistividades, estos resultados indican que en esta zona se han distribuido los materiales de arrastre de corriente, sobretodo en el área central y SW, en donde se perfila un posible paleocanal.

Hacia la zona NE más resistiva, la andesita aparece más somera. Esta descripción geológica coincide con el sondeo mecánico No. 28, el cual está situado a 500 metros del centro de la tomografía.

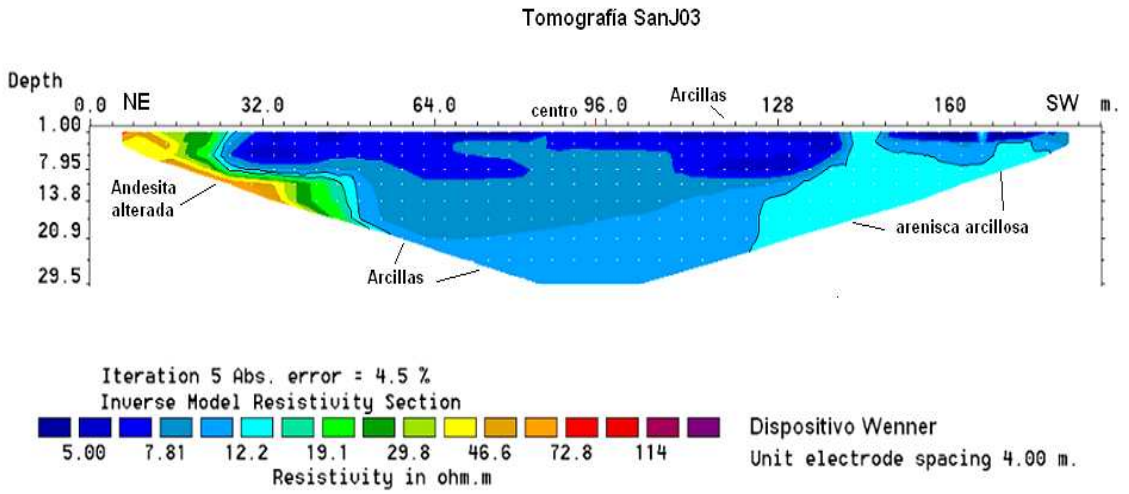


Figura 5.101. Interpretación de la tomografía SanJ03.

5.9.4.20 Tomografías SanJ14, SanJ15 y SanJ16.

Las tomografías SanJ14, SanJ15 y SanJ16, han sido interpretadas con el objetivo de evaluar la intrusión salina en el sector de la Playa El Uverito. Con esto

se pretende proponer la aplicación de esta metodología, propuesta por Avila et al. (2004), en sectores costeros del área de estudio. La misma consiste en la realización de tomografías transversales a la costa y entre estas, tal como se ilustra en la imagen de la figura 5.102.

En esta zona, la geología está compuesta de andesitas como basamento, aunque en el sector de la playa se aprecia un horizonte conglomerático por encima de esta, el espesor no alcanza el metro.

Los resultados indican que el sector próximo a la playa El Uverito, al Este, no existe evidencia de intrusión salina. La resistividad con un valor menor (5 Ω·m) corresponde a las arcillas y estas son producto de la alteración de la roca *in situ*. La profundidad de esta capa no alcanza los diez (10) metros y el centro de las tomografías se encuentra a la cota de 12 metros.

Por otro lado, la resistividad aumenta hacia la zona continental (56.8 Ω·m) y corresponde a las andesitas alteradas.

En la Figura 5.103, se ilustra una imagen de la disposición de los perfiles en las proximidades de la playa.

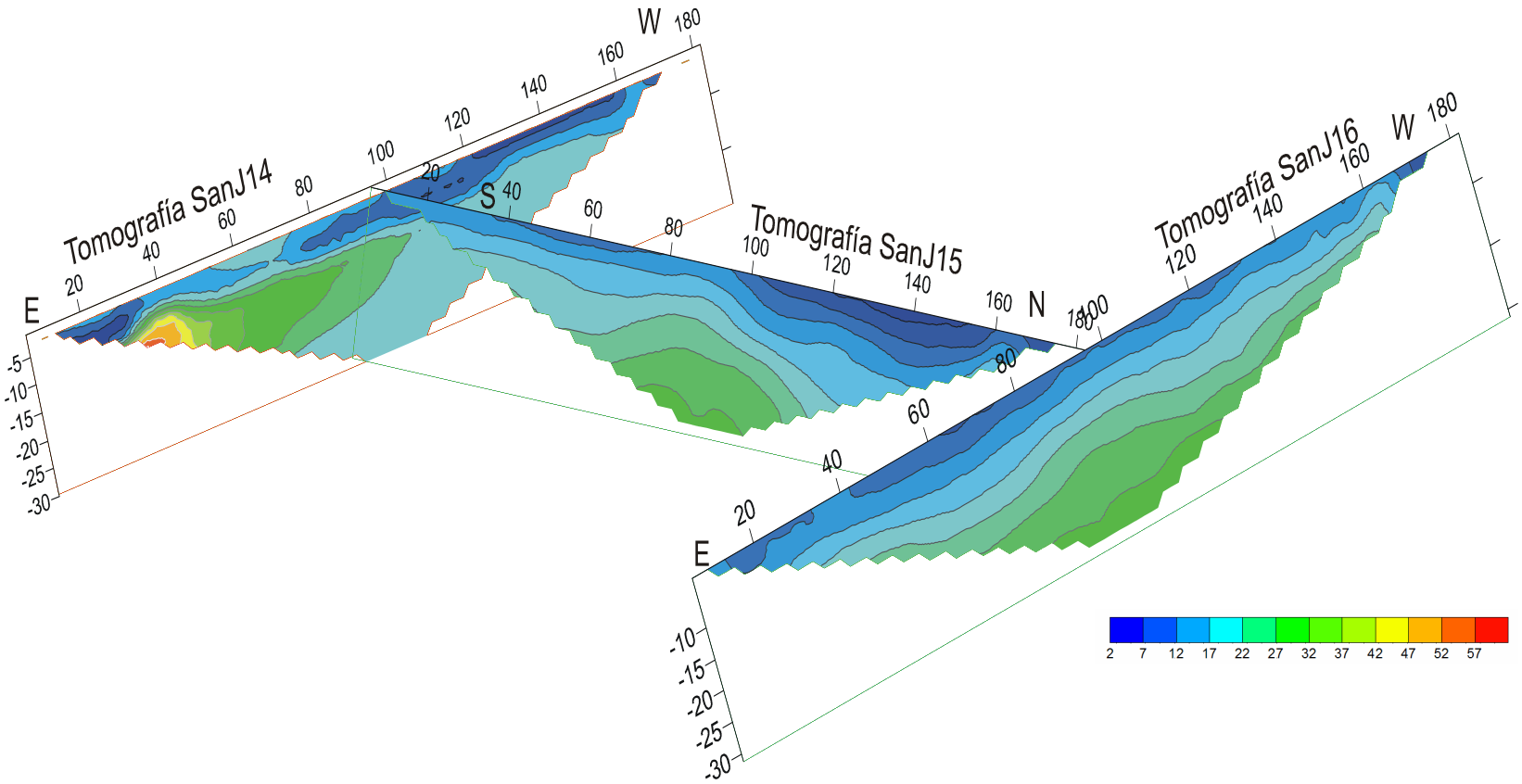


Figura 5.102. Distribución de la resistividad en las tomografías SanJ14, SanJ15 y SanJ16.

Figura 5.103. Imagen de El Uverito indicando la posición de las tomografías SanJ14, SanJ15 y SanJ16. Obsérvese la orientación del perfil SanJ14 en dirección a la zona de playa donde no aflora el basamento y se presentan dunas. Imagen de Google Earth ®.

En la Figura 5.102, es evidente la distribución homogénea del material, bajo el paquete de arcillas, esto sobretodo se aprecia en la tomografía SanJ16.

En un principio, se pensó en la existencia de intrusión salina por el hecho de que el sustrato rocoso es más profundo en la zona del entorno de la Tomografía SanJ14.

No se encontraron evidencias del proceso de intrusión salina en otros sondeos geoeléctricos realizados.

5.10 Cortes geo-eléctricos obtenidos a partir de la correlación con los sondeos mecánicos.

A partir de los datos obtenidos mediante los sondeos mecánicos y los geoeléctricos se han elaborado los Perfiles Geológicos AA´, BB´ y CC´. Estos sintetizan de manera adecuada la interpretación de los datos obtenidos en el campo. La ubicación de estos perfiles se presenta en la Figura 5.104 y los

perfiles geológicos preliminares se presentan en las Figuras # 5.105, 5.106, 5.107.

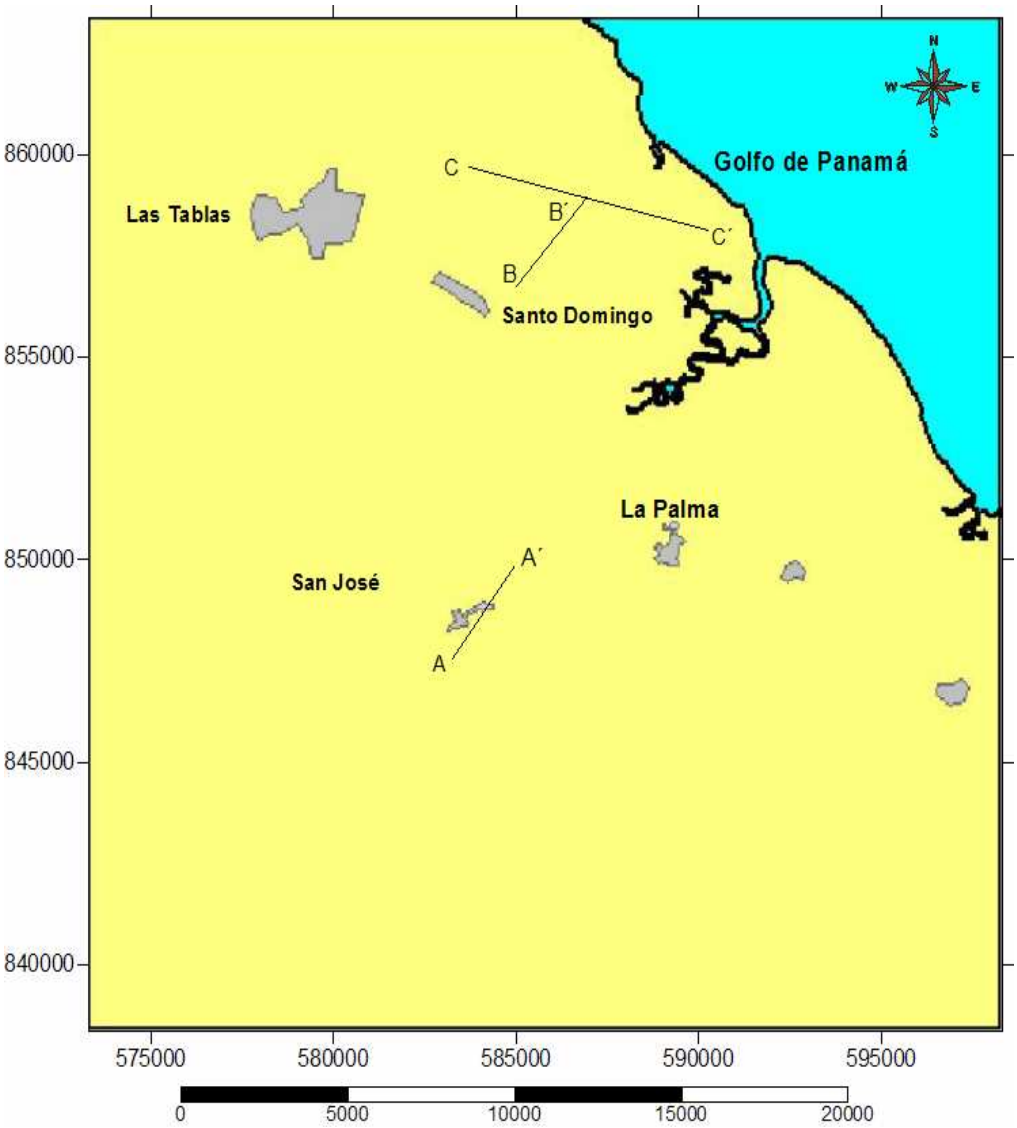


Figura 5.104. Localización de los perfiles geoeléctricos obtenidos a partir de la correlación entre los sondeos mecánicos y los geoeléctricos.

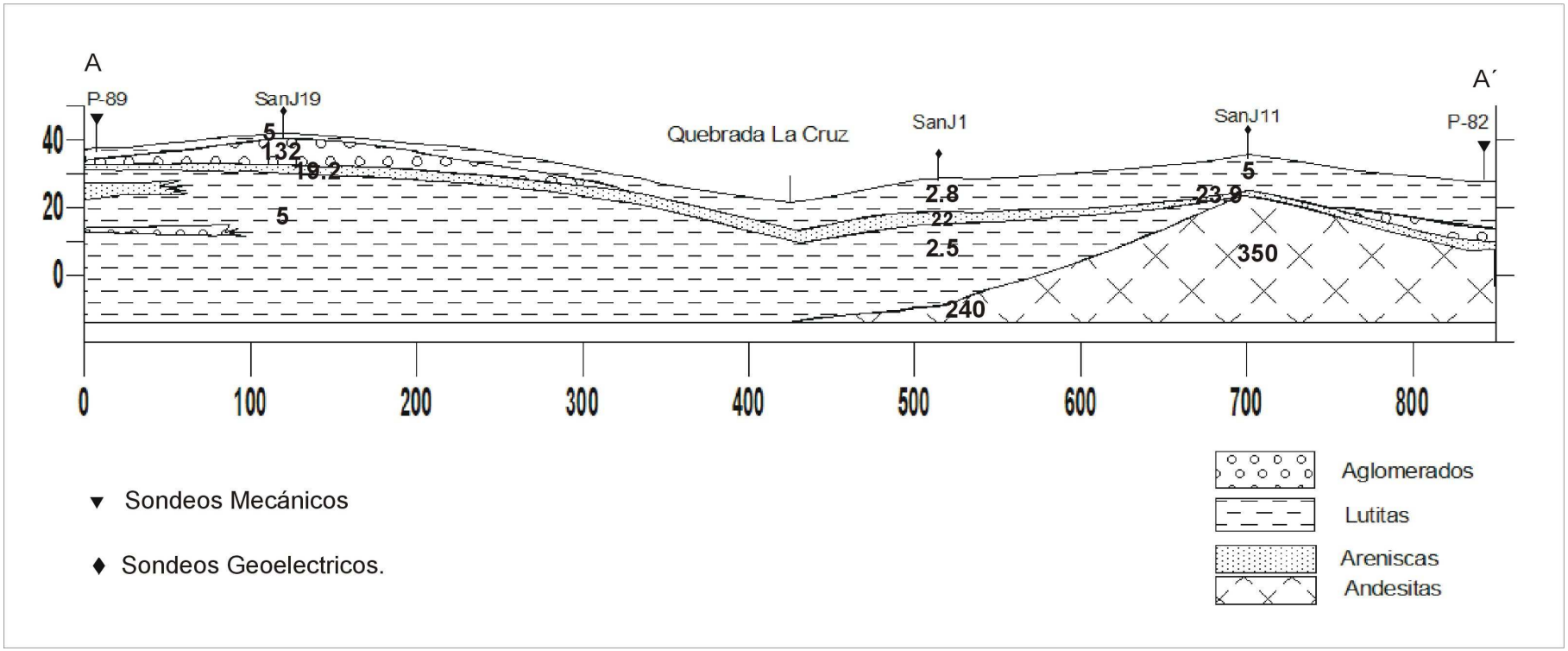


Figura 5.105. Perfil Geológico obtenido en el área de San José. La dirección es SW-NE.

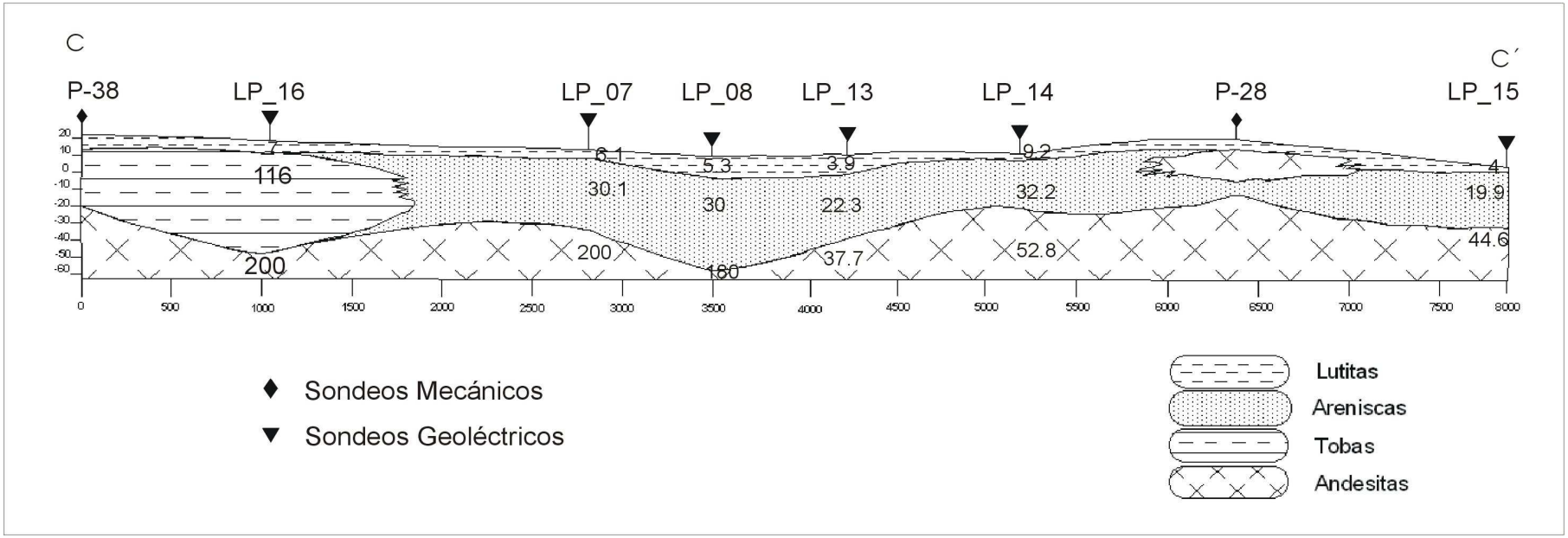


Figura 5.106. Perfil Geológico del sector NE de Las Tablas. La orientación del mismo es NW-SE.

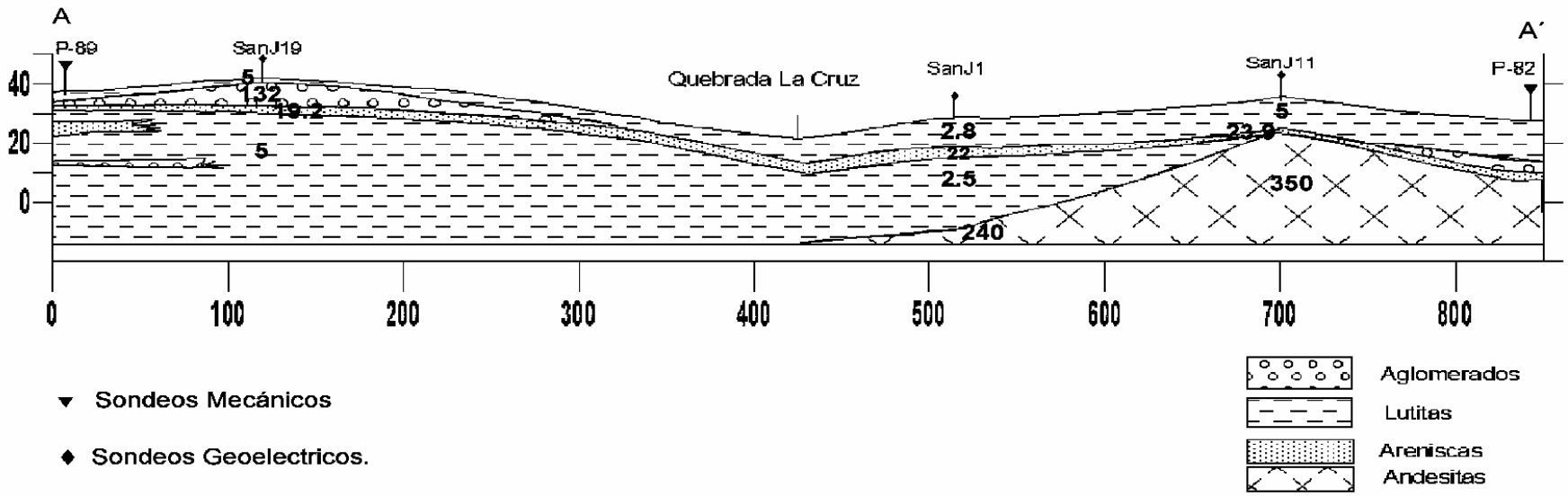


Figura 5.107. Perfil Geológico del sector NE de Santo Domingo. La orientación del mismo es SW-NE.