



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

CARACTERIZACIÓN SOMERA DE LA FALLA SAN RAMÓN MEDIANTE
TOMOGRFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGISTER EN CIENCIAS, MENCIÓN GEOFÍSICA

MAXIMILIANO JOAQUIN LEIVA SOTOMAYOR

PROFESOR GUÍA:
EMILIO VERA SOMMER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DANIEL DÍAZ ALVARADO
ANDREI MAKSYMOWICZ JERIA
GABRIEL VARGAS EASTON

SANTIAGO DE CHILE
2015

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO
DE: Magister en Ciencias, mención Geofísica
POR: Maximiliano Joaquin Leiva Sotomayor
FECHA: 17 de Agosto de 2015
PROFESOR GUIA: Emilio Vera Sommer

CARACTERIZACIÓN SOMERA DE LA FALLA SAN RAMÓN MEDIANTE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La Falla San Ramón identificada en el frente cordillerano al Este de la ciudad de Santiago, juega un papel importante en la evolución tectónica de Chile central. Más aún, su sola presencia es un elemento importante para los estudios de riesgo sísmico, planificación territorial, flujo de agua subterránea, entre otras instancias que involucren a la falla entre sus factores críticos.

Dado el avance de la urbanización y la acumulación de depósitos fluvioaluviales en el piedemonte, gran parte de su traza se encuentra cubierta. Esto hace necesario el uso de metodologías indirectas para el reconocimiento de la falla.

Con el fin de conocer la estructura de resistividad en torno a la Falla San Ramón y las perturbaciones que su cercanía a la superficie pudiese generar, se realiza un estudio de la resistividad en cuatro perfiles. Dos de los perfiles cruzan la traza observada de la falla, mientras que los dos restantes se ubican en zonas cubiertas por depósitos aluviales que no muestran perturbación superficial atribuible a la falla y donde su traza sólo ha sido inferida.

El análisis e interpretación de los perfiles que cruzan la traza observada de la falla permite reconocer los contrastes de resistividad atribuidos a la actividad ésta, así como rangos de resistividad característicos de los tipos de depósitos reconocidos en el piedemonte. En base a las características observadas en estos perfiles, se interpreta la ubicación de la falla en las zonas cubiertas y sin expresión superficial de ésta.

La interpretación de los modelos de resistividad permite dar mayor precisión en la ubicación de la traza en zonas donde previamente había sido localizada en base a estudios geológicos, además de precisar su ubicación en las zonas donde ha sido inferida.

*A Consuelo, mi bastión.
A Emilio, por mostrarme las cosas que importan.*

Agradecimientos

Terminar esta tesis no habría sido posible sin la confluencia de muchas personas y circunstancias. La paciente guía de mi mentor, don Emilio Vera. Los valiosos comentarios y perspectivas de los miembros de mi comisión, Daniel Díaz, Andrei Maksymowicz y Gabriel Vargas. El apoyo de mis colegas, Sergio Contreras, Luis Villegas y Felipe González.

Esta tesis fue posible gracias al apoyo del Núcleo de Geofísica Aplicada y el Programa de Riesgo Sísmico, quienes generaron los espacios de trabajo para el crecimiento y ejecución de esta tesis.

A nivel personal, no es posible cuantificar la importancia del apoyo de mis padres y mi hermana, quienes tuvieron la sabiduría de preguntar y no preguntar en los momentos precisos. Pero siempre apoyando.

Lo más importante para el final. Gracias a Consuelo, por estar en la tormenta regalando una sonrisa, una tontería, un abrazo. Gracias a Emilio, por sorprenderme día a día, por enseñarme la belleza de lo simple.

Tabla de contenido

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Introducción general | 1 |
| 1.2 Hipótesis | 2 |
| 1.3 Metodología | 3 |
| 1.4 Objetivos | 3 |
| 1.4.1 Objetivos principales | 3 |
| 1.4.2 Objetivos secundarios | 3 |
| 2. Fundamentos físicos y teóricos | 4 |
| 2.1 Resistividad Eléctrica | 4 |
| 2.1.1 Teoría de la resistividad | 4 |
| 2.1.2 Resistividad en rocas | 5 |
| 2.1.3 Arreglos geométricos | 10 |
| 2.1.4 Pseudosecciones de resistividad | 11 |
| 2.1.5 Tomografía de resistividad eléctrica | 13 |
| 2.1.6 Resistividad en medios heterogéneos 2D y 3D | 13 |
| 2.2 Inversión de resistividad | 15 |
| 3. Antecedentes geológicos | 20 |
| 3.1 Marco geotectónico | 20 |
| 3.2 Falla San Ramón | 22 |
| 3.3 Estratigrafía del entorno de la Falla San Ramón | 24 |
| 3.3.1 Formación Abanico | 24 |
| 3.3.2 Depósitos aluviales del Pleistoceno Inferior y Medio | 24 |
| 3.3.3 Depósitos aluviales del Pleistoceno Medio y Superior | 25 |
| 3.3.4 Depósitos aluviales del Pleistoceno Superior y Holoceno | 25 |
| 4. Antecedentes geofísicos | 26 |
| 4.1 Tomografía de resistividad eléctrica | 26 |
| 4.2 Sondaje eléctrico vertical | 30 |
| 4.3 Velocidad sísmica de onda P | 31 |
| 5. Reproceso y modelamiento de datos ERT preexistentes | 34 |
| 5.1 Recopilación de datos ERT | 35 |
| 5.1.1 Evaluación de los datos e información disponible | 35 |
| 5.1.2 Evaluación del proceso de inversión | 36 |
| 5.2 Reproceso | 38 |
| 5.2.1 Ubicación y representación 2-D | 39 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.2 Resistividad 3-D | 43 |
| 5.3 Modelo de inversión | 48 |
| 6. Adquisición, proceso y modelamiento de perfiles ERT propios | 52 |
| 6.1 Adquisición de datos | 52 |
| 6.1.1 Parque Monseñor Escrivá de Balaguer | 52 |
| 6.1.2 Bosque El Panul | 54 |
| 6.2 Proceso | 56 |
| 6.2.1 Ubicación y representación 2-D | 56 |
| 6.2.2 Resistividad 3-D | 58 |
| 6.3 Modelo de inversión | 60 |
| 7. Análisis y discusión de resultados | 64 |
| 7.1 Introducción | 64 |
| 7.2 Estratigrafía de los depósitos de piedemonte de frente cordillerano en las zonas de estudio | 64 |
| 7.2.1 Perfil San Ramón | 65 |
| 7.2.2 Perfil Quebrada de Macul | 66 |
| 7.2.3 Perfil Escrivá | 66 |
| 7.2.4 Perfil Panul | 67 |
| 7.3 Niveles estáticos de aguas subterráneas | 68 |
| 7.3.1 Perfil San Ramón | 68 |
| 7.3.2 Perfil Quebrada de Macul | 68 |
| 7.3.3 Perfil Escrivá | 70 |
| 7.3.4 Perfil Panul | 70 |
| 7.3.5 Resumen | 70 |
| 7.4 Estructura de resistividad sobre la traza observada de la Falla San Ramón | 71 |
| 7.4.1 Perfil San Ramón | 71 |
| 7.4.2 Perfil Quebrada de Macul | 72 |
| 7.4.3 Estructura de resistividad característica | 76 |
| 7.5 Estructura de resistividad en zonas cubiertas | 77 |
| 7.5.1 Perfil Escrivá | 77 |
| 7.5.2 Perfil Panul | 78 |
| 7.6 Resumen | 83 |
| 8. Conclusiones | 88 |
| Bibliografía | 90 |
| Anexo A | 96 |
| Anexo B | 103 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| 2.1 Características de arreglos geométricos 2-D | 11 |
| 4.1 Coordenadas referenciales de los perfiles ERT San Ramón y Quebrada de Macul | 27 |
| 4.2 Parámetros de adquisición del perfil San Ramón | 27 |
| 4.3 Parámetros de adquisición del perfil Quebrada de Macul | 27 |
| 4.4 Especificaciones de perfiles sísmicos | 31 |
| 5.1 Coordenadas de la proyección 2-D de los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul | 41 |
| 6.1 Coordenadas referenciales de los tendidos del perfil Escrivá | 53 |
| 6.2 Parámetros del perfil Escrivá | 53 |
| 6.3 Coordenadas referenciales de los tendidos del perfil Panul | 54 |
| 6.4 Parámetros del perfil Panul | 55 |
| 6.5 Coordenadas de la proyección 2-D del perfil Escrivá | 57 |
| 6.6 Coordenadas de la proyección 2-D del perfil Panul | 57 |
| A.1 Posición DGPS del perfil San Ramón | 97 |
| A.2 Posición DGPS del perfil Quebrada de Macul | 98 |
| A.3 Posición DGPS del perfil Panul | 100 |

Índice de ilustraciones

| | |
|---|----|
| 2.1 Medición de resistencia en un paralelepípedo | 5 |
| 2.2 Resistividad de distintos materiales geológicos | 6 |
| 2.3 Determinación de resistividad eléctrica del suelo mediante corriente continua | 7 |
| 2.4 Fuente puntual de corriente | 8 |
| 2.5 Arreglos geométricos típicos | 10 |
| 2.6 Pseudosecciones de resistividad aparente de distintos arreglos para un mismo modelo sintético | 12 |
| 3.1 Marco tectónico de la zona de estudio entre los 32°S y 35°S | 20 |
| 3.2 Morfoestratigrafía del frente cordillerano | 22 |
| 3.3 Morfología del escarpe de falla en Quebrada de Macul con mediciones DGPS | 23 |
| 4.1 Ubicación general de perfiles ERT | 28 |
| 4.2 Ubicación del perfil San Ramón | 28 |
| 4.3 Ubicación del perfil Quebrada de Macul | 29 |
| 4.4 Modelo de resistividad del perfil San Ramón (Díaz et al., 2014) | 29 |
| 4.5 Modelo de resistividad del perfil Quebrada de Macul (Díaz et al., 2014) | 29 |
| 4.6 Ubicación de los SEV junto al perfil San Ramón | 30 |
| 4.7 Resistividad aparente de SEV en perfil San Ramón | 31 |
| 4.8 Ubicación de perfiles sísmicos en Quebrada de Macul | 32 |
| 4.9 Modelos de velocidad de onda P y resistividad en Quebrada de Macul (Díaz et al., 2014) | 33 |
| 5.1 Acortamiento de perfiles ERT | 35 |
| 5.2 Modelos de resistividad y sensibilidad perfil San Ramón | 38 |
| 5.3 Modelos de resistividad y sensibilidad perfil Quebrada de Macul | 38 |
| 5.4 Disposición de electrodos del perfil San Ramón | 40 |
| 5.5 Disposición de electrodos del perfil Quebrada de Macul | 40 |
| 5.6 Perfil topográfico del segmento sin coordenadas del perfil San Ramón | 42 |
| 5.7 Perfil topográfico del perfil San Ramón | 43 |
| 5.8 Resistividad aparente con posiciones nominal y corregida del perfil San Ramón | 45 |
| 5.9 Resistividad aparente con posiciones nominal y corregida | 46 |

| | |
|--|-----|
| del perfil Quebrada de Macul | |
| 5.10 Diferencia porcentual entre resistividades aparentes | 47 |
| 5.11 Grillas utilizadas para modelación | 49 |
| 5.12 Modelo de resistividad reprocesado y original, perfil Quebrada de Macul | 50 |
| 5.13 Modelo de resistividad reprocesado y original, perfil San Ramón | 51 |
| 6.1 Ubicación del perfil Escrivá | 53 |
| 6.2 Ubicación del perfil Panul | 55 |
| 6.3 Disposición de los electrodos del perfil Escrivá | 56 |
| 6.4 Disposición de los electrodos del perfil Panul | 57 |
| 6.5 Resistividad aparente con posiciones nominal y corregida del perfil Panul y su diferencia porcentual | 59 |
| 6.6 Resistividad aparente con posiciones nominal y corregida del perfil Escrivá y su diferencia porcentual | 60 |
| 6.7 Grilla y modelo de resistividad del perfil Escrivá con ubicación de electrodos | 62 |
| 6.8 Grilla y modelo de resistividad del perfil Panul con ubicación de electrodos | 63 |
| 7.1 Morfoestratigrafía del frente cordillerano y ubicación de perfiles ERT | 67 |
| 7.2 Niveles estáticos en zona oriente de la cuenca de Santiago | 69 |
| 7.3 Mapeo de depósitos en frente cordillerano y ubicación de pozos registrados de interés | 69 |
| 7.4 Modelo de resistividad interpretado del perfil San Ramón | 74 |
| 7.5 Modelo de resistividad interpretado del perfil Quebrada de Macul | 75 |
| 7.6 Modelo de resistividad interpretado del perfil Escrivá | 81 |
| 7.7 Modelo de resistividad interpretado del perfil Panul | 82 |
| 7.8 Comparación de los modelos de los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul | 85 |
| 7.9 Comparación de los perfiles Quebrada de Macul y Panul | 86 |
| 7.10 Comparación de los perfiles Quebrada de Macul, Escrivá y Panul | 87 |
| B.1 Pseudosección de resistividad aparente Wenner-Schlumberger, perfil San Ramón | 104 |
| B.2 Pseudosección de resistividad aparente Wenner-Schlumberger, perfil Quebrada de Macul | 105 |
| B.3 Pseudosección de resistividad aparente Dipolo-Dipolo, perfil Escrivá | 106 |
| B.4 Pseudosección de resistividad aparente Wenner-Schlumberger, perfil Escrivá | 107 |

| | |
|--|-----|
| B.5 Pseudosección de resistividad aparente Dipolo-Dipolo, perfil Panul | 108 |
| B.6 Pseudosección de resistividad aparente Polo-Dipolo derecha, perfil Panul | 109 |
| B.7 Pseudosección de resistividad aparente Polo-Dipolo izquierda, perfil Panul | 110 |
| B.8 Modelo de sensibilidad, perfil San Ramón | 111 |
| B.9 Modelo de sensibilidad, perfil Quebrada de Macul | 112 |
| B.10 Modelo de sensibilidad, perfil Escrivá | 113 |
| B.11 Modelo de sensibilidad, perfil Panul | 114 |

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción general

En Chile central, el frente cordillerano en el borde este de la Depresión Intermedia representa un rasgo morfológico de primer orden claramente reconocible a partir del desnivel topográfico. En el caso de la cuenca de Santiago el límite entre frente cordillerano y cuenca ha sido redescubierto como una falla inversa activa, bautizada como Falla San Ramón (Rauld, 2002), de gran importancia en la evolución tectónica de los Andes de Chile central.

La Falla San Ramón, ubicada al pie del frente cordillerano en el sector oriente de Santiago, es una falla inversa de escala cortical de vergencia oeste, que pone en contacto unidades del bloque cordillerano con el relleno de la cuenca de Santiago. El estudio de la falla se ha visto limitado por la acumulación de depósitos fluvio-aluviales que la han cubierto, y más recientemente por la expansión urbana que ha destruido o cubierto gran parte de su expresión superficial. Esto limita el conocimiento de la ubicación precisa de la traza de la falla a los pocos lugares donde se conserva expresión superficial, mientras que el resto solamente se ha inferido a partir de distintos estudios geológicos (Rauld, 2011).

La influencia y control que la Falla San Ramón pueda ejercer en la morfología de la cuenca de Santiago (Rauld, 2002), la evolución tectónica regional (Armijo et al., 2006; Rauld, 2011), el riesgo sísmico derivado de la evidencia de actividad sísmica reciente (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011; Vargas et al., 2014) y en el flujo de aguas subterráneas (Díaz et al., 2014), hacen de gran importancia conocer la ubicación de su traza en el borde oriental de la cuenca de Santiago, así como su continuidad al norte y sur.

En el presente trabajo se propone el estudio de la estructura de resistividad eléctrica en la vecindad de la traza de la Falla San Ramón, orientado a desarrollar una metodología que permita el reconocimiento y mapeo extensivo de la Falla San Ramón en zonas cubiertas.

Con la información aportada y la metodología desarrollada se espera contribuir al conocimiento de la manifestación somera de la Falla San Ramón, con el fin de aportar a la planificación de estudios futuros sobre la falla y apoyar la toma de decisiones que involucren a la Falla San Ramón entre sus factores críticos.

Esta tesis forma parte del proyecto "Modelo y caracterización geofísica de fallas", desarrollado por el Núcleo de Geofísica Aplicada, con financiamiento parcial del Programa de Riesgo Sísmico del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

1.2 Hipótesis

En la cercanía de la superficie la Falla San Ramón genera variaciones horizontales y verticales en la resistividad eléctrica de la zona. Estas variaciones se explicarían principalmente por los siguientes factores:

- Cambios en el nivel freático, controlados por condiciones de permeabilidad en el plano de falla.
- La deformación en el relleno sedimentario superior de la cuenca de Santiago.
- Las diferentes composiciones de los estratos afectados por la falla.

Entonces, las variaciones de resistividad originadas por la falla pueden ser utilizadas para el mapeo de su traza en zonas cubiertas.

1.3 Metodología

Para verificar la hipótesis planteada, se dispone de 2 perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) sobre zonas donde se ha reconocido y caracterizado la Falla San Ramón (Díaz et al., 2014). Estos perfiles de ERT permitirán caracterizar las variaciones de resistividad producidas por la falla a partir del análisis de modelos de inversión de resistividad.

La caracterización de estos modelos será utilizada para identificar la Falla San Ramón en los modelos de resistividad que se obtengan para perfiles de ERT adquiridos en zonas donde su traza ha sido sólo inferida.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos principales

- Estudiar la estructura de resistividad eléctrica en los segmentos conocidos de la Falla San Ramón.
- Identificar la Falla San Ramón en zonas cubiertas, donde su traza ha sido inferida, en base a una estructura característica de resistividad eléctrica.

1.4.2 Objetivos secundarios

- Obtener modelos 2D revisados para los perfiles de ERT registrados anteriormente (Díaz et al., 2014) y para los adquiridos como parte de esta tesis.
- Interpretar la estructura de resistividad eléctrica observada en las zonas donde la traza de la Falla San Ramón es observada o inferida, en base a su caracterización geológica (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011).
- Elaborar un criterio de identificación de la traza de la falla en base a su caracterización geoelectrica.

Capítulo 2

Fundamentos Físicos y Teóricos

2.1 Resistividad Eléctrica

2.1.1 Teoría de la Resistividad

La resistividad eléctrica es una propiedad intrínseca de un cierto material, que mide la oposición que éste ofrece al flujo de una corriente eléctrica a través de él. El flujo de corriente eléctrica J (Carga/[Área x Tiempo]), es proporcional al campo eléctrico E :

$$J = \frac{1}{\rho} E = \sigma \quad (2.1)$$

donde ρ es la resistividad eléctrica y $\sigma = 1/\rho$ es la conductividad eléctrica del material.

Entonces, para un mismo campo eléctrico el flujo de corriente es inversamente proporcional a la resistividad. Para un paralelepípedo de cierto material, sección A y largo L sometido a una diferencia de voltaje ΔV entre sus caras y por el cual circula una intensidad de corriente I (Carga/Tiempo) (Figura 2.1), la expresión 2.1 se especializa a:

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta V}{L} \quad (2.2)$$

De 2.2 podemos despejar la resistividad eléctrica:

$$\rho = R \left(\frac{A}{L} \right) \quad (2.3)$$

donde A/L es un factor geométrico del paralelepípedo y

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.4)$$

corresponde a la Ley de Ohm, donde R es la resistencia eléctrica, cuya unidad de medida en el Sistema Internacional (SI) es el Ohm. Entonces, la resistividad ρ es igual a la resistencia R multiplicada por la sección A del paralelepípedo y dividida por su largo L , y sus unidades son consecuentemente el Ohm*m.

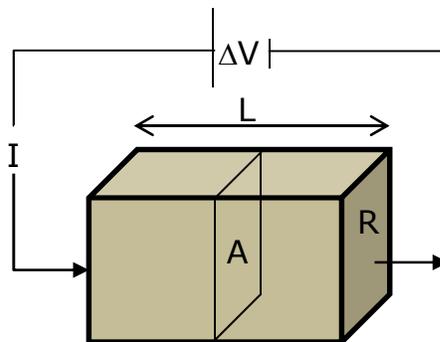


Figura 2.1: Medición de resistencia en un paralelepípedo de material.

2.1.2 Resistividad en rocas

La resistividad eléctrica varía de forma importante entre distintos materiales, particularmente entre distintos tipos de materiales geológicos. Adicionalmente, para cada material se puede observar un amplio rango de resistividades (Figura 2.2). Entre los factores que influyen en el rango de resistividad de un material se encuentran:

- Porosidad: los espacios vacíos pueden ser ocupados con fluidos de resistividad distinta a la matriz rocosa, alterando la resistividad total del material.
- Saturación: un mayor porcentaje de porosidades llenas conllevará un mayor cambio en la resistividad resultante.
- Resistividad de los fluidos saturantes: fluidos con valores de resistividad muy distintos a la matriz rocosa producirán cambios mayores que fluidos con menor contraste.
- Contenido de limos y arcillas: estos sedimentos finos interactúan con los fluidos presentes disolviendo iones, lo que contribuye a la disminución de la resistividad.

(Archie, 1942; Archie, 1947; Waxman y Smits, 1968; Lesmes y Friedman, 2005)

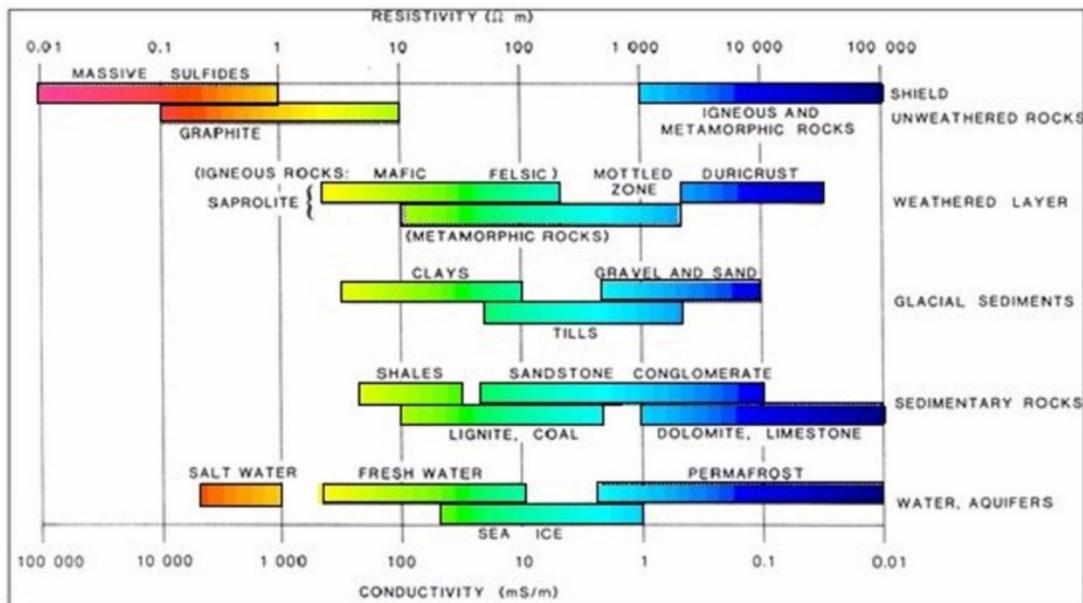


Figura 2.2: Resistividad de distintos materiales geológicos (Palacky, 1987).

Para determinar la resistividad eléctrica del suelo, se acude normalmente al modelo más simple donde se supone el suelo está limitado por una superficie plana, y está constituido por un material de resistividad eléctrica constante. Mediante dos electrodos ubicados en la superficie y conectados a una batería o fuente de corriente continua, se inyecta corriente (I) en el suelo a través del electrodo positivo de inyección (A), la que se recupera por el electrodo negativo de retorno (B). El flujo de corriente producido de esta manera establece un campo eléctrico en el medio y las consecuentes diferencias de potencial, las que normalmente pueden medirse entre dos puntos cualquiera de la superficie, digamos puntos M y N (Figura 2.3). Como se verá más

abajo, la resistividad del suelo puede ser obtenida a partir de la corriente I que fluye entre los electrodos A y B, la diferencia de potencial entre los electrodos M y N, y la disposición geométrica relativa entre ellos.

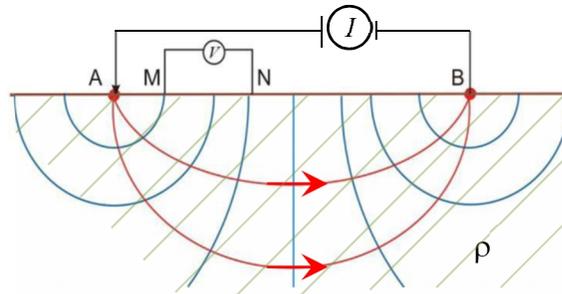


Figura 2.3: Determinación de resistividad eléctrica del suelo mediante la inyección de corriente continua. Líneas de flujo de corriente (rojas) y equipotenciales (azules) en un medio de resistividad ρ uniforme (Robinson, 1989).

Potencial de un electrodo

Para determinar la resistividad eléctrica del suelo, el problema básico a resolver es el del potencial eléctrico producido por la inyección de corriente mediante un electrodo en la superficie plana de un medio de resistividad eléctrica constante (Figura 2.4). En este caso, la corriente inyectada al suelo fluye homogéneamente en todas direcciones estableciendo un frente de corriente semiesférico. El área de este frente es:

$$A = 2\pi d^2 \quad (2.5)$$

donde d es la distancia entre el electrodo de inyección y un punto de la superficie semiesférica.

De manera intuitiva, semi-informal, utilizando la expresión 2.3, con A dado en 2.5 y $L=d$, se obtiene una expresión para la resistencia del suelo entre el electrodo y un punto del casquete semiesférico de radio d :

$$R = \rho / 2\pi d \quad (2.6)$$

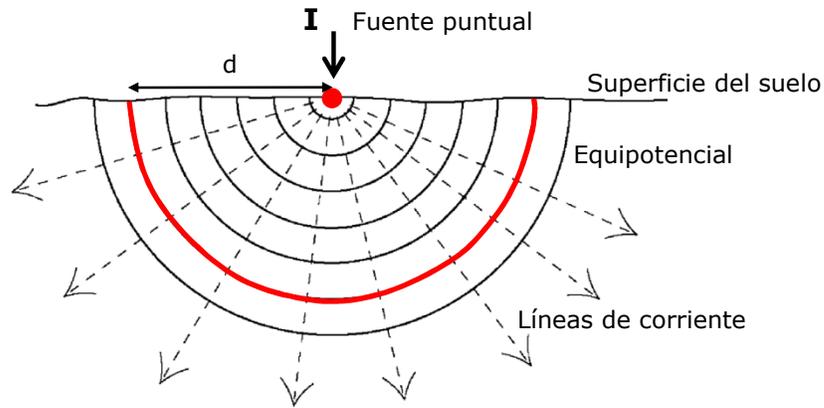


Figura 2.4. Fuente puntual de corriente: electrodo mediante el cual se inyecta una corriente I.

Combinando esta última expresión con la Ley de Ohm (ecuación 2.4) para la diferencia de potencial entre el electrodo de inyección y la superficie semiesférica de radio d se obtiene:

$$\Delta V = I\rho/2\pi d \quad (2.7)$$

En esta superficie el potencial es constante y se trata entonces de una superficie equipotencial.

El análisis llevado a cabo hasta aquí para un electrodo de inyección de corriente, puede inmediatamente aplicarse a un electrodo de retorno, simplemente invirtiendo el signo de la corriente. Entonces, el potencial de un punto M ubicado a una distancia d_1 del electrodo de inyección (corriente I) y a una distancia d_2 del electrodo de retorno (corriente $-I$), puede ser expresado como la suma del potencial generado por el electrodo de inyección y el electrodo de retorno en el punto M.

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad (2.8)$$

Esta ecuación puede usarse para calcular el potencial punto a punto en todo el semiespacio. A partir de ella puede calcularse la distribución del potencial en el semiespacio y determinar las superficies equipotenciales.

Para determinar la resistividad del suelo en el terreno, se utilizan arreglos de cuatro electrodos superficiales. Dos electrodos se usan para la inyección de corriente en el suelo, electrodos A y B, y dos electrodos utilizados para medir diferencias de potencial eléctrico entre dos puntos cualquiera, M y N (Figura 2.3).

De acuerdo a 2.8, para los voltajes en M y N se tiene:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (2.9)$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (2.10)$$

donde AM, BM, AN y BN corresponden a las distancias entre los electrodos de corriente (A, B) y de potencial (M, N). Por lo tanto, la diferencia de potencial V_M entre M y N es:

$$V_M = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2.11)$$

a partir de la cual se despeja la resistividad como:

$$\rho = K * \frac{V_M}{I} = \rho_a \quad (2.12)$$

donde K es el factor geométrico de la disposición de electrodos, con unidades de longitud, y que depende de la configuración relativa entre ellos:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (2.13)$$

En la práctica, el suelo no es un semiespacio homogéneo de resistividad constante. Las heterogeneidades que existen bajo la superficie hacen que la resistividad observada varíe según la ubicación de los electrodos (Bertrand, 1967). La resistividad calculada de este modo (ecuación 2.12) es entonces

una resistividad aparente (ρ_a) que corresponde a un promedio volumétrico de los valores de resistividad del suelo.

2.1.3 Arreglos Geométricos

La forma en la cual se disponen los electrodos en terreno puede ser completamente arbitraria. Existen sin embargo algunas configuraciones comúnmente utilizadas llamadas arreglos geométricos o simplemente arreglos. Los arreglos más comunes son Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo y Polo-Dipolo (Figura 2.5). Cada arreglo tiene distintas "fortalezas y debilidades", según la forma en que fluye la corriente y la distribución de las superficies equipotenciales (Edwards, 1977; Griffiths y Barker, 1993; Dahlin y Loke, 1997; Loke, 2001; Seaton y Burbey, 2002; Samouëlian et al., 2005; Case, 2012 y Okpoli, 2013).

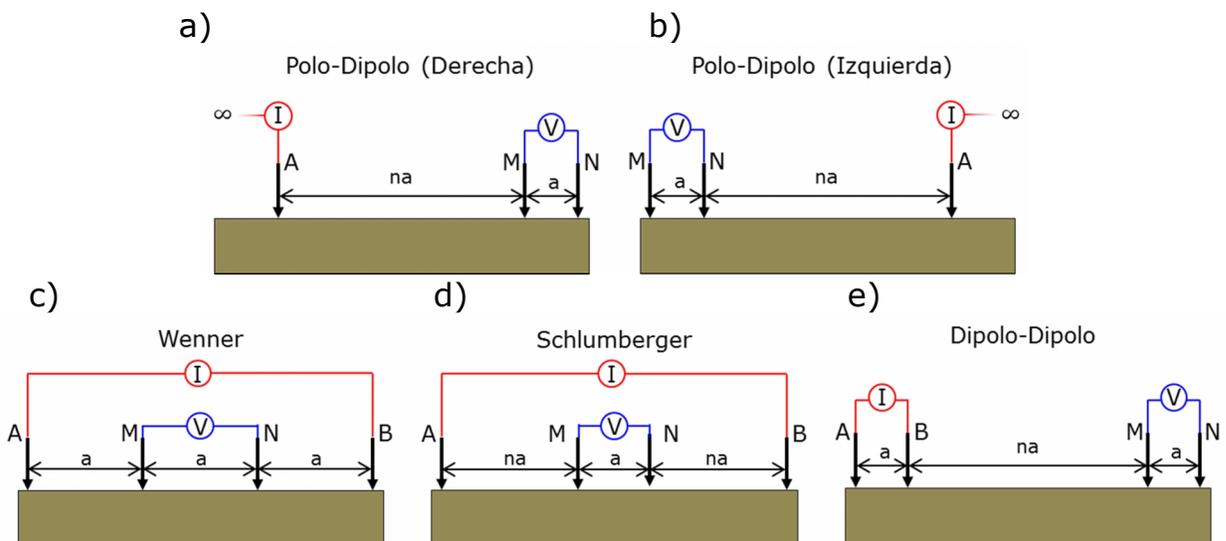


Figura 2.5: Arreglos geométricos típicos. Polo-dipolo (a y b) asume que el electrodo de retorno de corriente está a una distancia tal que no produce diferencia de potencial entre M y N. Los arreglos Wenner y Schlumberger (c y d) son simétricos respecto a su punto central, siendo Wenner un caso particular de Schlumberger. Dipolo-dipolo presenta una simetría tal que permite intercambiar los electrodos de corriente y voltaje recuperando la misma resistividad aparente.

Tabla 2.1: Características de arreglos geométricos 2D (Modificada de Samouëlian et al., 2005)

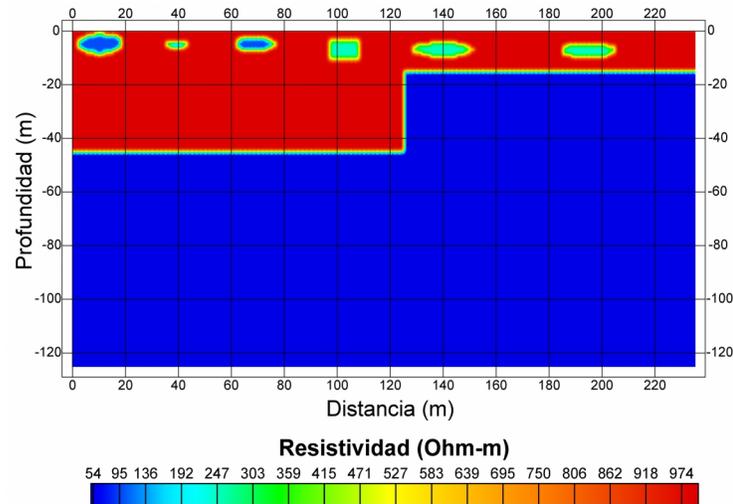
| | Wenner-Schlumberger | Dipolo-Dipolo | Polo-Dipolo |
|---|---------------------|---------------|-------------|
| Sensibilidad a variaciones verticales | 4 | 1 | 2 |
| Sensibilidad a variaciones horizontales | 1 | 4 | 1 |
| Profundidad de investigación | 1 | 3 | 3 |
| Cobertura horizontal de los datos | 1 | 3 | 3 |
| Intensidad de señal | 4 | 1 | 2 |

La tabla 2.1 resume algunas de las características de los arreglos geométricos 2D más comúnmente utilizados. La escala de valores usada en la descripción comparativa es de 1 a 4, en donde los valores más bajos indican una debilidad y los valores altos indican una fortaleza.

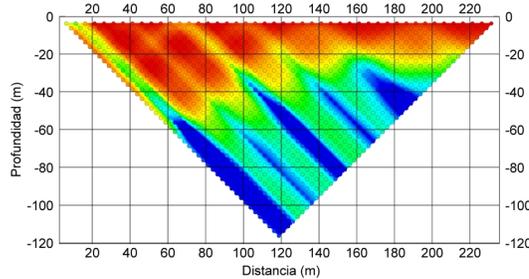
2.1.4 Pseudosecciones de Resistividad

Cada medición de resistividad aparente es representativa de un promedio de los valores de resistividad en un volumen de suelo por debajo de los electrodos utilizados en la medición. Establecer una profundidad real del punto que es representado por esta medición no es algo sencillo, aunque sí es intuitivo que está vinculado a la geometría relativa de los electrodos utilizados (Edwards, 1977).

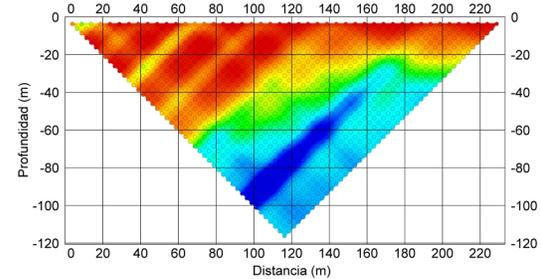
a)



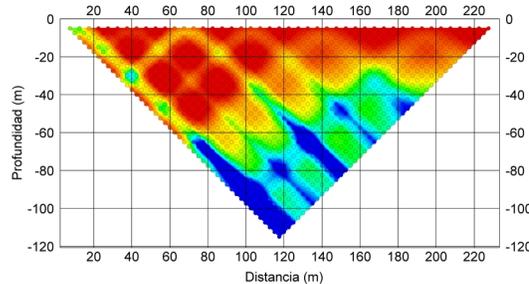
b) Polo-Dipolo Izquierda



c) Polo-Dipolo Derecha



d) Dipolo-Dipolo



e) Wenner

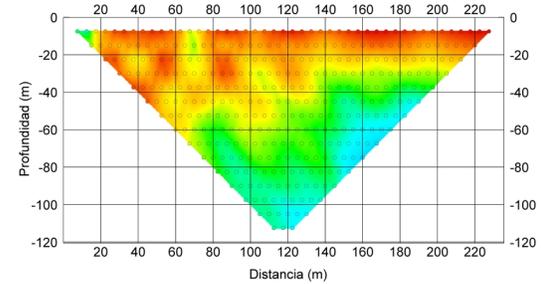


Figura 2.6: a) Modelo sintético de resistividad 2D. Pseudosecciones asociadas: b) Polo-Dipolo Izquierda, c) Polo-Dipolo Derecha, d) Dipolo-Dipolo y e) Wenner.

Una de las formas más utilizadas para la construcción de las pseudosecciones se basa en utilizar las posiciones relativas de los electrodos más distantes entre sí, sean estos de corriente, potencial o uno de cada tipo. La ubicación a lo largo de la línea sobre la cual se realiza la medición corresponde al punto medio entre los electrodos, mientras que la profundidad aparente o pseudoprofundidad corresponde a una fracción de este espaciamento, típicamente la mitad. De esta forma, una pseudosección típica tiene la forma

de un triángulo invertido, en donde la profundidad de los datos es sólo referencial (Figura 2.6).

2.1.5 Tomografía de Resistividad Eléctrica

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT por sus siglas en inglés) consiste en la adquisición de múltiples mediciones de resistividad aparente (desde decenas a miles) con distinta ubicación de los electrodos, normalmente a lo largo de un perfil lineal, de forma tal de determinar una distribución de resistividades aparentes producto de las heterogeneidades en la resistividad del suelo, a lo largo del perfil sobre el cual se ubican los electrodos.

Las resistividades aparentes pueden ser representadas en una pseudosección, en donde cada medición se ubica en una posición a lo largo del perfil a una profundidad acorde a la geometría de los electrodos utilizados en su adquisición. Esto conforma una Pseudosección de resistividad aparente, en la cual los valores muestran una imagen distorsionada de la distribución real de resistividad en el suelo, estrechamente vinculada a la configuración de los electrodos (Andrews et al., 1995).

Si bien las pseudosecciones de resistividad aparente obtenidas mediante una ERT permiten examinar los datos y realizar algunas interpretaciones cualitativas preliminares, por si solas no son suficientes para determinar la estructura de resistividad del subsuelo. Sin embargo, esta información de resistividad aparente puede utilizarse para generar un modelo de la distribución de resistividades mediante un proceso de inversión, el cual puede ser usado para análisis e interpretación cuantitativa.

2.1.6 Resistividad en medios heterogéneos 2D y 3D

La Ley de Ohm es una relación lineal entre el flujo de corriente \vec{j} con la intensidad de campo eléctrico \vec{E} . Para medios eléctricamente isótropos, la constante de proporcionalidad es la conductividad eléctrica escalar $\sigma=1/\rho$, tal que:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \quad (2.14)$$

Como los campos eléctricos estacionarios (corriente continua) son conservativos,

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (2.15)$$

donde V es el potencial eléctrico. Por lo tanto,

$$\vec{j} = -\sigma \nabla V \quad (2.16)$$

Considerando un sistema de coordenadas cartesianas en donde el eje z apunta hacia un semiespacio conductor y $\sigma = 0$ para $z < 0$, aplicamos el principio de conservación de carga en un elemento infinitesimal de volumen y al usar la ecuación de continuidad de la densidad de corriente se obtiene,

$$\nabla \cdot \vec{j} = \frac{\partial q}{\partial t} \delta(x) \delta(y) \delta(z) \quad (2.17)$$

donde q es la densidad de carga específica para una fuente en el origen. Esta ecuación puede ser reescrita de forma generalizada para un espacio tridimensional con fuente de corriente en el punto (x_s, y_s, z_s) , donde se inyecta la corriente como

$$-\nabla[\sigma(x, y, z) \nabla V(x, y, z)] = \frac{\partial q}{\partial t} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (2.18)$$

O desarrollando el operador gradiente:

$$\nabla \sigma(x, y, z) \nabla V(x, y, z) + \sigma(x, y, z) \nabla^2 V(x, y, z) = -\frac{\partial q}{\partial t} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (2.19)$$

Para el caso 2D se asume que no existen cambios en la distribución de la conductividad en la dirección y (rumbo), es decir,

$$\frac{\partial}{\partial y} [\sigma(x, y, z)] = 0 \quad (2.20)$$

Por lo que la ecuación 2.19 puede ser reescrita como

$$\nabla\sigma(x, z)\nabla V(x, y, z) + \sigma(x, z)\nabla^2 V(x, y, z) = -\frac{\partial q}{\partial t}\delta(x - x_s)\delta(y - y_s)\delta(z - z_s) \quad (2.21)$$

Tanto las ecuaciones 2.19 como 2.21 son ecuaciones diferenciales del potencial eléctrico para una distribución arbitraria de resistividad dentro de un semiespacio y punto de partida para el modelamiento de las mediciones ERT. Las soluciones analíticas son posibles sólo para algunas configuraciones sencillas de resistividad, por lo que esta ecuación se debe resolver de forma numérica. Algunos ejemplos de resoluciones numéricas discretas de estas ecuaciones se pueden encontrar en Dey y Morrison (1979a y 1979b), McGillivray (1992), Spitzer (1995), Ren y Tang (2010), entre otros.

2.2 Inversión de Resistividad

La inversión de datos geofísicos consiste en encontrar un modelo discreto capaz de reproducir los datos observados, que nos permite obtener un modelo de resistividad real basada en las observaciones de resistividad aparente de una ERT.

En esta tesis se utiliza el software DCIP2D v5.0 (Huber, 1964; Ekblom, 1973 y 1987; Calamai y Moré, 1987; Oldenburg et al., 1993; Ellis y Oldenburg, 1994; Farquharson y Oldenburg, 1998; Rutley et al., 2001), una librería de programas de modelamiento directo e inverso de resistividad DC y polarización inducida de estructuras 2D, disponible comercialmente.

El proceso de inversión parte por realizar una modelación directa de la respuesta generada por un modelo inicial. Dicho modelo inicial puede ser ingresado por el usuario o generado automáticamente como el semiespacio homogéneo que mejor ajusta los datos.

La metodología de inversión busca a partir de un set de datos, como las mediciones de resistividad aparente de un perfil ERT, $d_o = (d_o, d_o, \dots, d_o)$, con N el número de observaciones y d_i el i-ésimo dato, encontrar un modelo discreto $m = (m_1, m_2, \dots, m_M)$, con M el número de celdas que conforman el modelo y m_j el valor de conductividad de la j-ésima celda, que reproduzca adecuadamente las observaciones.

Los datos reales tienen errores, por lo que no siempre se quiere ajustar exactamente los valores medidos. Lo que se busca es un ajuste dentro del rango de certeza de los datos, evitando así la aparición de artefactos producto del ajuste de datos ruidosos o sobreajuste. En el otro extremo, subajustar los datos puede hacer que el modelo obtenido no refleje toda la información contenida en los datos. De esto se desprende la necesidad de establecer correctamente el nivel de ajuste deseado.

Para ello se define un criterio de ajuste global de la forma:

$$\psi_d = \|W_d(Gm - d)\|^2 \quad (2.22)$$

En donde W_d es la matriz de ponderación y G es la función de Green, que permite calcular la respuesta del modelo, en este caso, la resistividad aparente comparable con los datos. Asumiendo que el ruido de los datos es aleatorio, no tiene correlación y tiene promedio cero, esta matriz es diagonal de dimensión $N \times N$, es decir, $W_d = \text{diag}(1/\epsilon_1, \dots, 1/\epsilon_N)$, donde ϵ_i es la desviación estándar del i -ésimo dato. La suma cuadrática de la diferencia de los pares dato-respuesta multiplicada por su ponderación entrega el valor objetivo del criterio de ajuste global.

La elección de esta forma para la función de ajuste es tal que ψ_d es una variable distribuida como una función chi cuadrada con N grados de libertad, con una media de aproximadamente N , que será el valor de ajuste objetivo de la inversión, ψ_d . Este es el criterio de ajuste utilizado en DCIP2D, pero no es el único y dentro de las opciones de inversión existe la posibilidad de modificar este criterio.

En general, la distribución de resistividad en el suelo es complicada. Por esto, es importante que M , el número de celdas del modelo, sea grande. Usualmente M es mayor que N , el número de datos. El problema inverso generalmente no tiene solución única y existen infinitos modelos capaces de reproducir los datos, pero no todos son geofísica y geológicamente aceptables.

Existen distintas formas de condicionar la solución del problema inverso para que produzca resultados aceptables y realistas, las cuales usualmente tratan de evitar cambios abruptos o la presencia de valores extremadamente altos y/o bajos. En los casos en que se dispone de información de otras fuentes,

una forma común de condicionar la solución es buscar un modelo que se asemeje al conocimiento a priori disponible.

Las condiciones con las cuales se busca generar un modelo de determinadas características son agrupadas en una "función objetivo del modelo", la cual produce un modelo acorde a las características deseadas cuando es minimizada. Características tales como la suavidad del modelo, si existe un modelo conceptual de la zona que se desee emular, posibles conocimientos a priori derivados de otras fuentes, tales como sondajes o estudios petrofísicos de muestras, etc., son puestas dentro de la función objetivo del modelo.

La función objetivo del modelo (ψ_m) es concebida para generar un modelo que tenga la menor variabilidad posible, tanto vertical como horizontalmente, al tiempo que se asemeje lo más posible a un modelo referencial m_0 . La función que se busca minimizar es de la forma:

$$\begin{aligned} \psi_m(m, m_0) = & \alpha_s \iint w_s(x, z)(m - m_0)^2 dx dz \\ & + \iint \left[\alpha_x w_x(x, z) \left(\frac{\partial(m - m_0)}{\partial x} \right)^2 + \alpha_z w_z(x, z) \left(\frac{\partial(m - m_0)}{\partial z} \right)^2 \right] dx dz \end{aligned} \quad (2.23)$$

Donde las funciones w_s , w_x y w_z son ponderaciones definidas para cada celda del modelo, α_s es un factor que controla la importancia relativa de la similitud entre el modelo generado y el modelo referencia m_0 , mientras que α_x y α_z controlan la relevancia de la suavidad del modelo en ambas direcciones. La proporción α_x/α_z permite generar modelos con mayor suavidad en alguna dirección preferencial. La forma discreta de la función objetivo es:

$$\psi_m = (m - m_0)^T \{ \alpha_s W_s^T W_s + \alpha_x W_x^T W_x + \alpha_z W_z^T W_z \} (m - m_0), \quad (2.24a)$$

$$= (m - m_0)^T W_m^T W_m (m - m_0) \quad (2.24b)$$

$$= \|W_m(m - m_0)\|^2 \quad (2.24c)$$

Si w_s , w_x y w_z son definidos con valor unitario constante, W_s es una matriz diagonal con elementos $\sqrt{\Delta x \Delta z}$, donde Δx es el largo de las celdas y Δz es su alto, W_x tiene elementos de la forma $\sqrt{\Delta z / dx}$ donde dx es la distancia entre los centros de celdas adyacentes horizontalmente, W_z tiene elementos de la forma $\sqrt{\Delta x / dz}$, donde dz es la distancia entre los centros de celdas

adyacentes verticalmente, y W_m es la matriz general de ponderaciones que aúna las condicionantes dadas por W_s , W_x y W_z .

El problema inverso se formula entonces como un problema de optimización:

$$\text{Minimizar } \psi_m(m, m_0) = \|W_m(m - m_0)\|^2 \quad (2.25)$$

$$\text{Sujeto a } \psi_d(d - d_0) = \|W_d(Gm - d)\|^2 = \psi_d^*$$

Donde la minimización de ψ_m entrega un modelo que se asemeja a m_0 según las características recogidas en W_m y la métrica utilizada.

La dependencia de los datos con la resistividad es no lineal, por lo que se usa una linealización de la función objetivo en torno al modelo $m(n)$ considerado en la iteración más una perturbación del modelo, la cual es resuelta y utilizada para actualizar el modelo en curso. El cálculo de la respuesta del modelo es llevado a cabo siguiendo el algoritmo desarrollado por McGillivray (1992). Sustituyendo $m(n+1) = m(n) + \delta m$ en la función objetivo de la ecuación 2.16.:

$$\psi_m(m + \delta m) = \|W_d(F_d [m(n)] + J\delta m - d)\|^2 + \beta \|W_m(m + \delta m - m_0)\|^2 + \text{T.M.O.} \quad (2.26)$$

Donde J es la matriz de sensibilidad y el elemento J_{ii} cuantifica la influencia que cambios en la celda j -ésima del modelo producen en el dato i -ésimo, de forma tal que

$$J = \frac{\partial d_i}{\partial m_j} \quad (2.27)$$

Despreciando los términos de mayor orden (T.M.O.) e igualando a cero la derivación con respecto a δm se obtiene

$$(J^T W_d J + \beta W_m^T W_m) \delta m = -J^T W_d (F_d [m(n)] - d) - \beta W_m^T W_m \{m(n) - m_0\} \quad (2.28)$$

Esta ecuación se resuelve para encontrar la perturbación del modelo δm . El nuevo modelo se genera por

$$m(n + 1) = m(n) + \gamma \delta m \quad (2.29)$$

Donde $\gamma \in (0,1]$ limita el tamaño del cambio en el modelo y es seleccionado para asegurar que la función objetivo es minimizada.

La descripción del detalle del procedimiento de inversión y sus posibles variaciones escapan a los alcances de este trabajo, pero están disponibles para el lector en los trabajos previamente citados.

Capítulo 3

Antecedentes geológicos

3.1 Marco geotectónico

La zona de estudio se encuentra en torno a la latitud 33.5°S , en la cual las principales unidades morfoestructurales presentes son la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia y la Cordillera de los Andes (Figura 3.1). Estas unidades se presentan con un rumbo aproximado N-S en la región de la zona de estudio, aunque en torno a los 34°S ocurre un cambio a rumbo NNE-SSW (Farías, 2007).

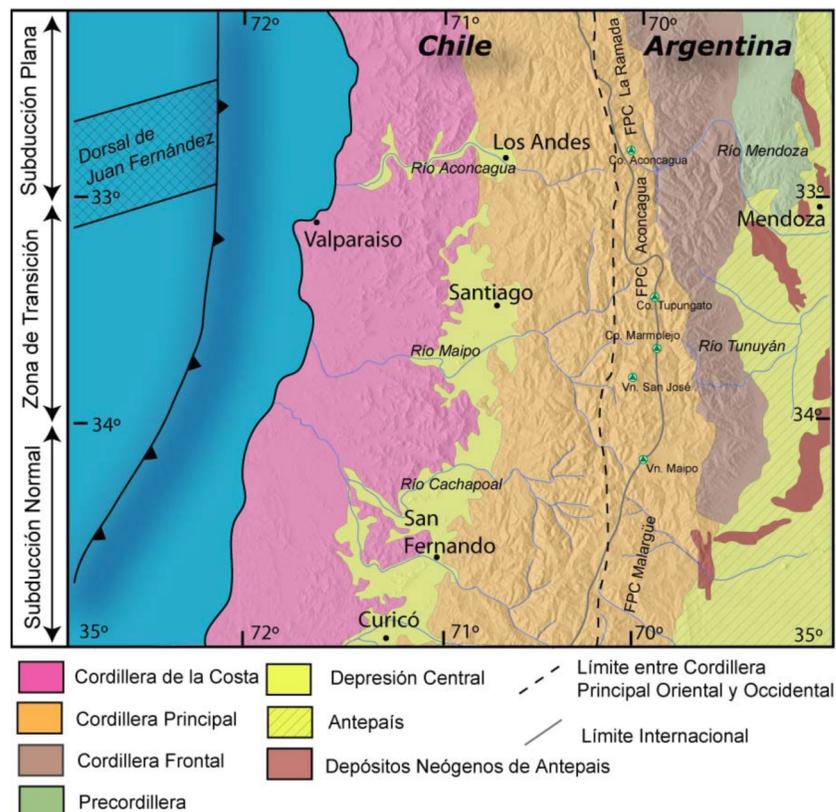


Figura 3.1: Marco tectónico de la zona de estudio y sus principales unidades morfoestructurales (Fock, 2005).

En la Depresión Intermedia se desarrolla una cuenca elongada con orientación norte-sur, que corresponde a la cuenca de Santiago. El relleno sedimentario alcanza un espesor de hasta 500m en los sectores más profundos, de acuerdo a estimaciones realizadas mediante estudios gravimétricos (Kausel, 1959; Araneda et al., 2000; Yañez et al., 2015).

La formación de la cuenca de Santiago se ha planteado como producto de procesos tectónicos, siendo originalmente descrita como un graben extensional, delimitado por fallas normales al este y oeste (Brüggen, 1950). La concepción de la cuenca como un graben extensional fue formalizada por Carter y Aguirre (1965), al ser nombradas las fallas que lo delimitan como Falla Pocuro en el este y Falla Los Ángeles en el oeste. Posteriormente Thiele (1980) cartografió en la Hoja Geológica de Santiago una falla normal al oriente de Santiago, correspondiente a la Falla Pocuro.

Estudios recientes muestran que, contrario a lo creído por más de medio siglo, la Falla San Ramón, en el piedemonte santiaguino, no corresponde a una falla normal, sino a una falla inversa que coloca unidades del bloque cordillerano sobre la Depresión Intermedia (Figura 3.2; Rauld, 2002; Rauld et al., 2006; Armijo et al., 2006, Armijo et al., 2010, Rauld, 2011). El primer trabajo en reconocerla como una falla inversa de vergencia oeste fue Rauld (2002), y la nombró como Falla San Ramón, por su cercanía al cordón San Ramón. De esta forma, la cuenca de Santiago es delimitada en el sur por el progresivo angostamiento de la Depresión Intermedia que llega a su cierre en la localidad de Angostura, el límite norte lo establece el Cordón de Chacabuco, en el oeste limita con la falla Los Angeles, mientras que el límite este lo define la Falla San Ramón.

La Falla San Ramón marca el límite entre la Depresión Intermedia y la Cordillera de los Andes, distinguible a partir del importante desnivel topográfico entre los sedimentos de la cuenca de Santiago y los cerros que forman el frente cordillerano occidental. Se trata de una estructura de escala cortical con ruptura superficial, que miente al este con un ángulo aproximado de 55° (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011). El desplazamiento vertical mínimo estimado que ha producido la Falla San Ramón se estima en torno a los 3,5km, medido entre el punto más bajo del basamento de la cuenca de Santiago y la cumbre del cerro San Ramón (3.253 m.s.n.m.), con una tasa de deslizamiento promedio entre 0,25 y 0,4mm/año (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011).

3.2 Falla San Ramón (FSR)

La expresión superficial más clara de la Falla San Ramón se da en un segmento de longitud cercana a los 15km, comprendido entre el Cerro Calán y la Quebrada de Macul (Figura 3.2), aproximadamente, con elevaciones que fluctúan entre los 700 y 1.000 m.s.n.m.. A lo largo de este segmento antiguamente eran visibles escarpes y rasgos morfológicos asociados a la traza de la falla (Tricart et al., 1965; Borde, 1966). En los años posteriores al reconocimiento de la falla como inversa y activa (Rauld, 2002; Rauld et al., 2006, Armijo et al., 2006) se generó gran interés en el mapeo detallado de la traza, pero parte importante de estos indicadores superficiales habían sido cubiertos por la expansión urbana de Santiago.

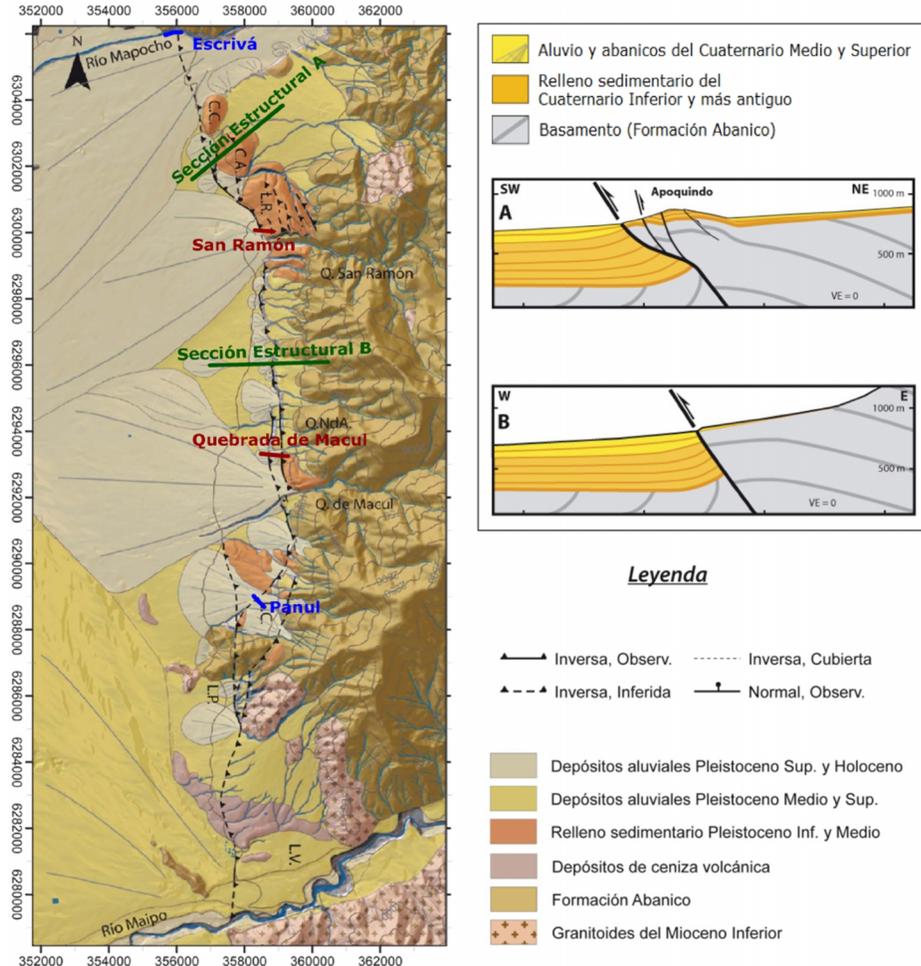


Figura 3.2: Morfoestratigrafía del frente cordillerano entre los ríos Mapocho y Maipo, traza observada e inferida de la Falla San Ramón, secciones estructurales interpretadas y ubicación de perfiles ERT que serán presentados en capítulos posteriores. Modificado de Armijo et al. (2010) y Rauld (2011).

Entre las quebradas San Ramón y Macul los depósitos sedimentarios superficiales en torno a la traza conocida de la falla no muestran plegamiento y se estima que su espesor no supera los 20m, atendiendo a lo pequeño de los abanicos aluviales correspondientes a los cauces menores del sector (Armijo et al., 2010). Por el contrario, frente a las quebradas San Ramón y Macul los abanicos aluviales son de mayor tamaño, estimando el espesor sedimentario en torno a los 100m (Armijo et al., 2010).

Aproximadamente 1km al norte de la Quebrada de Macul, se encuentra un escarpe de falla bien preservado, que correspondería a él o a los últimos eventos sísmicos ocurridos en la Falla San Ramón. Rauld (2011) determina un desplazamiento vertical aparente de 3 a 3,7 m, en base a un levantamiento GPS Diferencial (DGPS) realizado en el área (Figura 3.3). A partir de este desplazamiento y la observación de la morfología del escarpe se estima que habría ocurrido producto de un solo evento con desplazamiento en torno a los 4m, o como resultado de varios eventos con desplazamientos en el orden de 1 m o menores (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011). Como no se conoce bien la geometría y largo de la falla, se estima que la magnitud de los posibles eventos asociados a la formación de este escarpe oscilaría entre Mw 6,6 y Mw 7,4, mientras que el tiempo de recurrencia sería de 2.500 a 10.000 años, en base a la tasa de deslizamiento promedio calculada (Armijo et al., 2010). El estudio realizado por Vargas et al. (2014) en trincheras excavadas en el escarpe previamente identificado en esta zona estima un desplazamiento superficial máximo de 5m, lo que en base a la estructura reconocida de la Falla San Ramón (Armijo et al., 2010; Perez et al., 2013) habría sido generado por un evento de magnitud entre Mw 7.25 y Mw 7.5.

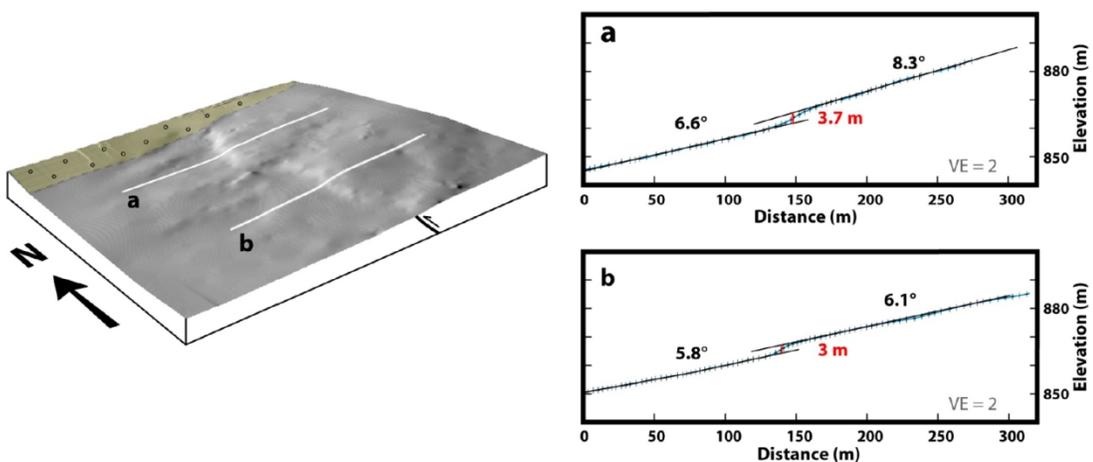


Figura 3.3: Morfología del escarpe observado al norte de la Quebrada de Macul y perfiles DGPS medidos en el área (Armijo et al., 2010).

A lo largo y al sur del abanico aluvial correspondiente a la Quebrada de Macul no se aprecian signos superficiales de escarpes, posiblemente debido a la rápida acumulación de sedimentos y repetidos eventos de aluviones (Armijo et al., 2010), como el de 1993, que cubrirían cualquier indicio superficial (Naranjo y Varela, 1996; Sepúlveda et al., 2006).

3.3 Estratigrafía del entorno de la Falla San Ramón

En el frente cordillerano donde es observada o inferida la Falla San Ramón se reconocen tres tipos de depósitos, según sus edades relativas (Figura 3.4) (Rauld, 2011). La unidad ubicada por debajo de estos depósitos corresponde a la Formación Abanico.

3.3.1 Formación Abanico

Secuencia volcánica con intercalaciones piroclásticas y sedimentarias continentales con un espesor total aproximado de 2.000m, con un rango de edad entre el Eoceno Superior y el Mioceno Inferior (Aguirre, 1960). El contacto por falla entre esta unidad y los depósitos no consolidados del relleno de la cuenca de Santiago se encuentra mayoritariamente cubierto; sin embargo, en el área de estudio se reconocen afloramientos de este contacto en la quebrada de Apoquindo, entre los cerros Los Rulos y Apoquindo, y al norte del cerro Calán (Rauld, 2011).

3.3.2 Depósitos aluviales del Pleistoceno Inferior y Medio

En el sector norte del área de estudio (cerros Calán, Apoquindo y Los Rulos), su base se compone por depósitos de gravas fluviales, mientras que en la parte superior se compone por depósitos de flujos de detritos, con intercalaciones de arenas, gravilla y limos, cubiertos por depósitos de flujos de detritos y barro (Rauld, 2002, 2011).

En el sector de Quebrada de Macul corresponde a depósitos de piedemonte de tipo aluvial y escombros de falda. Se componen de bloques angulosos de lavas y brechas con tamaños que varían entre 10 y 80 cm en una matriz de material fino. Más al sur, en los sectores de Lo Cañas y Lo Planella se encuentran depósitos de esta unidad interpretados como deslizamientos, que

corresponden a clastos angulosos en una matriz predominantemente arcillosa (Rauld, 2002, 2011).

3.3.3 Depósitos aluviales del Pleistoceno Medio y Superior

Distribuidos a lo largo de todo el frente cordillerano en el área de estudio. Corresponden a depósitos aluviales producto de flujos de detritos y barro con bloques angulosos de tamaño variable entre algunos centímetros y hasta dos metros de diámetro, en una matriz de materiales finos (limos y arcillas), con intercalaciones de arenas y materiales más finos (Rauld, 2011). En los niveles superiores de la unidad se reconocen depósitos de ceniza volcánica similar a la de la Ignimbrita Pudahuel (Gana et al., 1996).

3.3.4 Depósitos aluviales del Pleistoceno Superior y Holoceno

Corresponden a depósitos aluviales constituyentes de los abanicos aluviales más recientes y activos. En general los depósitos que los conforman se asocian a flujos de detritos y/o barro, constituida por bloques angulosos de tamaño variable entre 10cm y 3m, contenidos en una matriz de material fino, con intercalaciones de arena y finos (Rauld, 2011).

Capítulo 4

Antecedentes Geofísicos

A partir del redescubrimiento de la Falla San Ramón como una falla inversa y activa (Rauld, 2002), surge un gran interés por su estudio, pero gran parte de la expresión superficial de la falla que fue reconocible en el pasado (Brüggen, 1950; Tricart, 1965; Carter y Aguirre, 1965; Borde, 1966; Thiele, 1980) ha sido cubierta por el crecimiento de la ciudad hacia el piedemonte santiaguino y los depósitos fluvio-aluviales recientes (Naranjo y Varela, 1996; Sepúlveda et al., 2006).

Los estudios relativos la Falla San Ramón son limitados en número y cobertura (Rauld, 2002, 2011; Armijo et al., 2010; Díaz et al., 2014; Pérez et al., 2014; Vargas et al., 2014; Yañez et al., 2015). Esto es particularmente crítico cuando se trata de los estudios geofísicos realizados sobre la traza de la falla.

La información geofísica sobre la expresión superficial de la Falla San Ramón disponible y publicada hasta el momento es la presentada en Díaz et al. (2014). Ahí se muestra el resultado de estudios geofísicos de diferentes métodos, tales como velocidad sísmica de onda P, perfiles ERT y sondaje eléctrico vertical (SEV).

4.1 Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)

En el contexto de los proyectos "Evaluación del peligro sísmico de la Falla San Ramón" de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN, proyecto #CHI9020) y "Estudio de riesgo y modificación PRMS Falla San Ramón" del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Proyecto #640-27-LP10), ambos ejecutados en conjunto con el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, fueron adquiridos dos perfiles de ERT por la empresa Wellfield Services entre el 31 de Enero y 11 de Febrero de 2012. Los perfiles se

ubicaron en dos sectores donde se conoce la ubicación de la traza de la Falla San Ramón (Figura 4.1), observada mediante escarpes bien preservados y estudiados (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011) y trincheras excavadas para estudios paleosismológicos (Vargas y Rebolledo, 2012). Uno de los perfiles se adquirió en las cercanías de la Quebrada San Ramón (Figura 4.2), mientras que el otro perfil fue adquirido en las cercanías de la Quebrada de Macul (Figura 4.3), llamados San Ramón y Quebrada de Macul, respectivamente. La ubicación, longitud y los parámetros geométricos de los perfiles se dan en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Tabla 4.1: Coordenadas referenciales de los perfiles ERT (UTM 19S, WGS84)

| Perfil | Coordenadas del punto inicial | | | Coordenadas del punto final | | |
|-------------------|-------------------------------|-----------|-------|-----------------------------|-----------|-------|
| | Este | Norte | Cota | Este | Norte | Cota |
| San Ramón | 358341.2 | 6300071.8 | 778.3 | 358879.1 | 6300019.4 | 890.8 |
| Quebrada de Macul | 358509.1 | 6293308.7 | 828.3 | 359310.8 | 6293235.1 | 947.7 |

Tabla 4.2: Parámetros del perfil San Ramón

| | |
|---------------------------------------|---------------------|
| Espaciamiento de electrodos (nominal) | 7m |
| Número de posiciones de electrodos | 81 |
| Largo nominal | 560m |
| Número de tendidos realizados | 1 |
| Arreglo Geométrico utilizado | Wenner-Schlumberger |
| Largo efectivo en planta | 540.4m |
| Largo efectivo en superficie | 552.0m |

Tabla 4.3: Parámetros del perfil Quebrada de Macul

| | |
|---------------------------------------|----------------------|
| Espaciamiento de electrodos (nominal) | 7m |
| Número de posiciones de electrodos | 121 |
| Largo nominal | 840m |
| Número de tendidos realizados | 3 |
| Traslape entre tendidos | 420m / 61 electrodos |
| Arreglo Geométrico utilizado | Wenner-Schlumberger |
| Largo efectivo en planta | 805.1m |
| Largo efectivo en superficie | 813.9m |

Las mediciones fueron realizadas con el sistema de adquisición ABEM SAS 1000, en conjunto con el sistema de switching de electrodos ABEM 10-64C y un set de cables multielectrodos. Las posiciones de algunos de los electrodos fueron registradas mediante una Estación topográfica y GPS Trimble XRT, con corrección diferencial Omnistar. Para el proceso e inversión de datos (Figuras 4.4 y 4.5) se utilizó el software Res2Dinv v3.58 para inversión 2D rápida de resistividad e IP con el uso del método de mínimos cuadrados (de Groot-Hedlin y Constable, 1990; Sasaki, 1992; Loke, 2001; Loke et al., 2003), desarrollado por Geotomo software, disponible comercialmente.



Figura 4.1: Ubicación general de perfiles ERT y quebradas cercanas que le dan sus respectivos nombres.

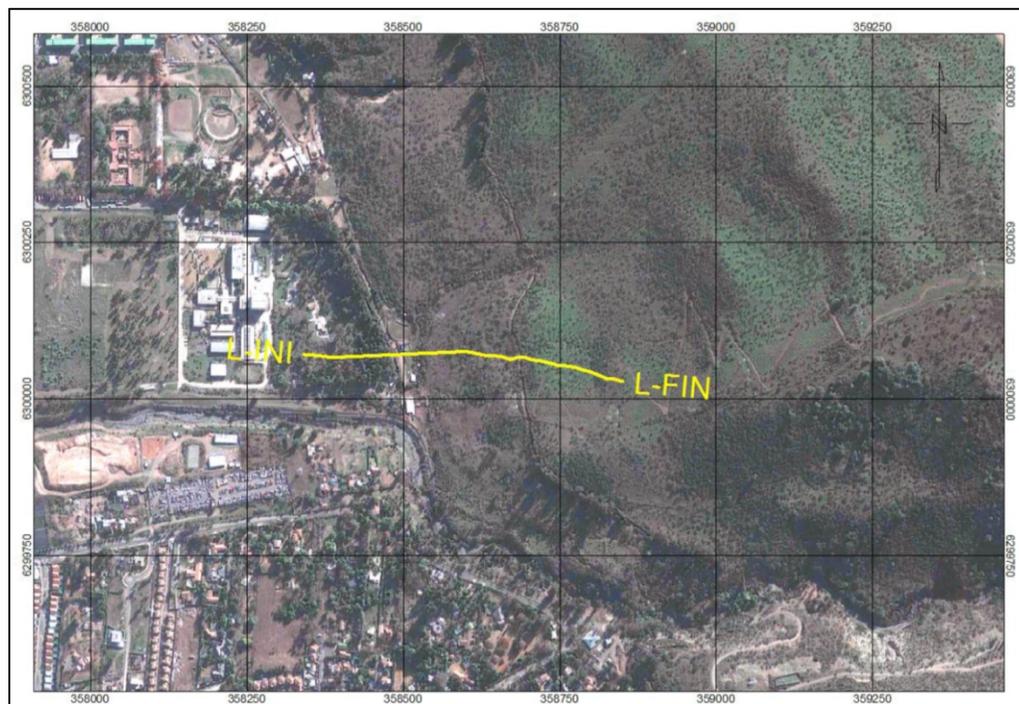


Figura 4.2: Ubicación del perfil ERT San Ramón.



Figura 4.3: Ubicación del perfil ERT Quebrada de Macul.

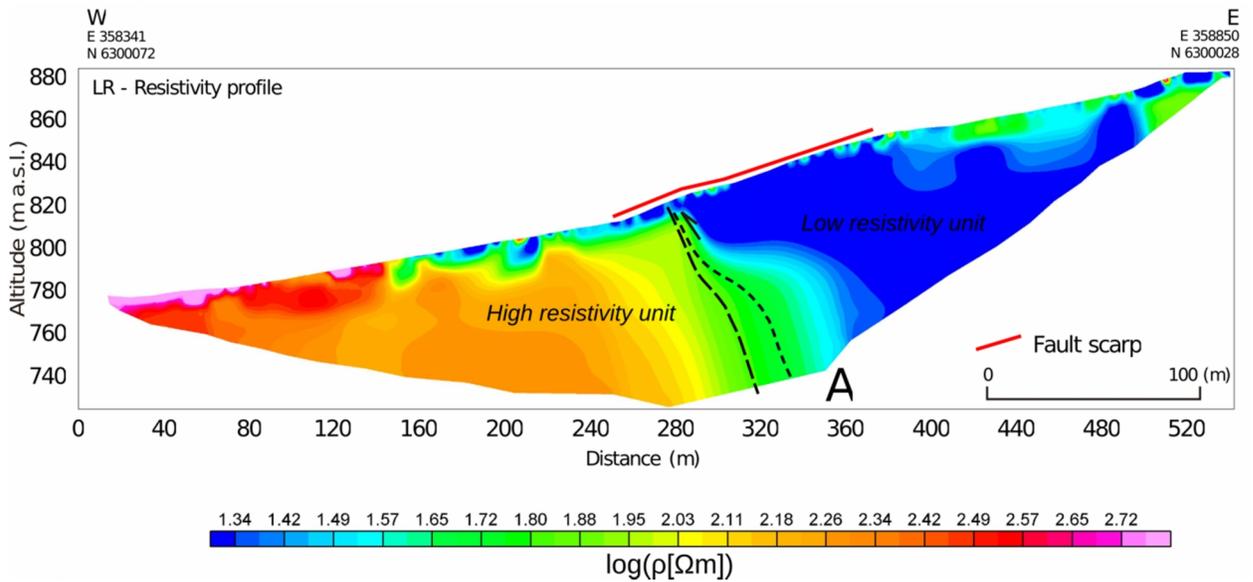


Figura 4.4: Modelo de Resistividad del perfil San Ramón (Díaz et al., 2014).

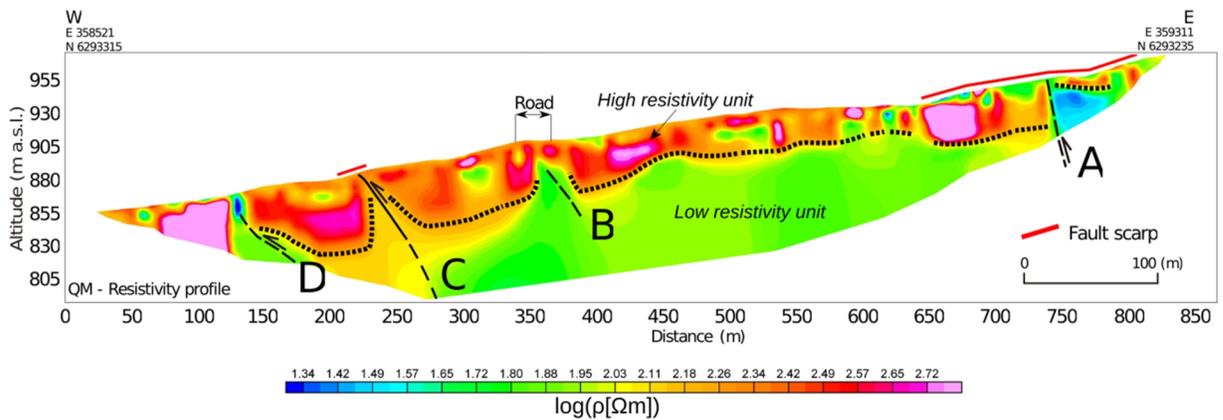


Figura 4.5: Modelo de Resistividad del perfil Quebrada de Macul (Díaz et al., 2014).

4.2 Sondaje Eléctrico Vertical (SEV)

De manera posterior a la adquisición del perfil ERT en el sector de la Quebrada San Ramón (Figura 4.4), se llevaron a cabo 2 SEV adicionales en la zona. Estos sondajes fueron ubicados uno al este y otro al oeste del escarpe de falla (Figura 4.6) para verificar el alto contraste de resistividad observado (Figura 4.4).

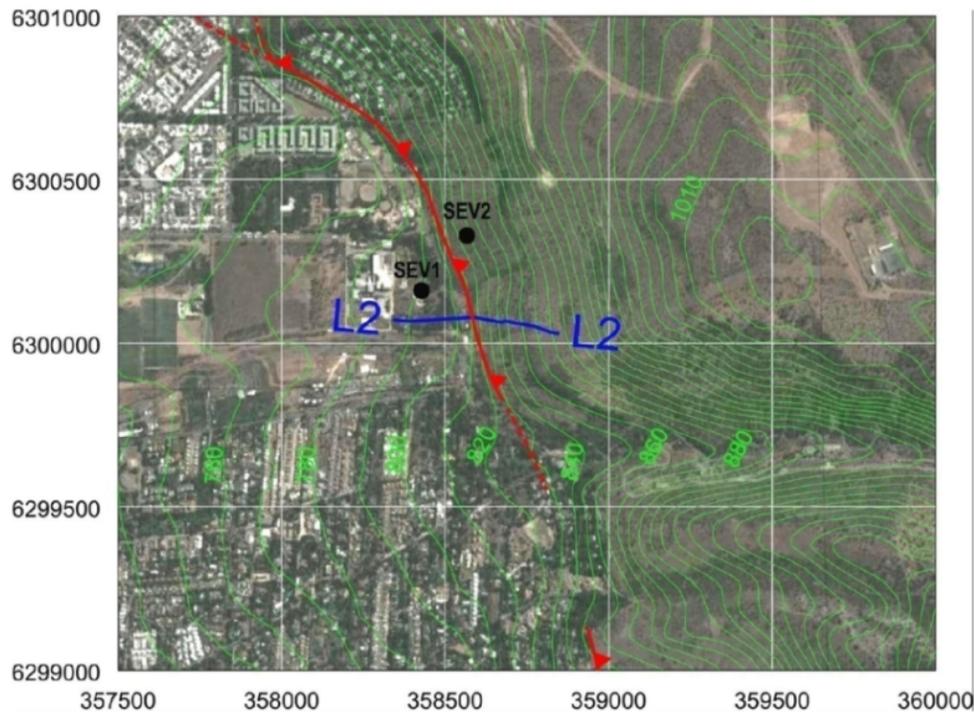


Figura 4.6: Ubicación de los SEV medidos junto al perfil ERT L2 (San Ramón). La línea roja muestra la ubicación aproximada de la traza superficial de la Falla San Ramón (Armijo et al., 2010). Sistema de coordenadas UTM zona 19S, WGS84. Imagen extraída de Díaz et al. (2014).

Si bien no se elabora un modelo a partir de los datos observados, la diferencia en las resistividades aparentes observadas a ambos lados de la falla es evidente (Figura 4.7), comprobando lo observado en el modelo ERT de la zona.

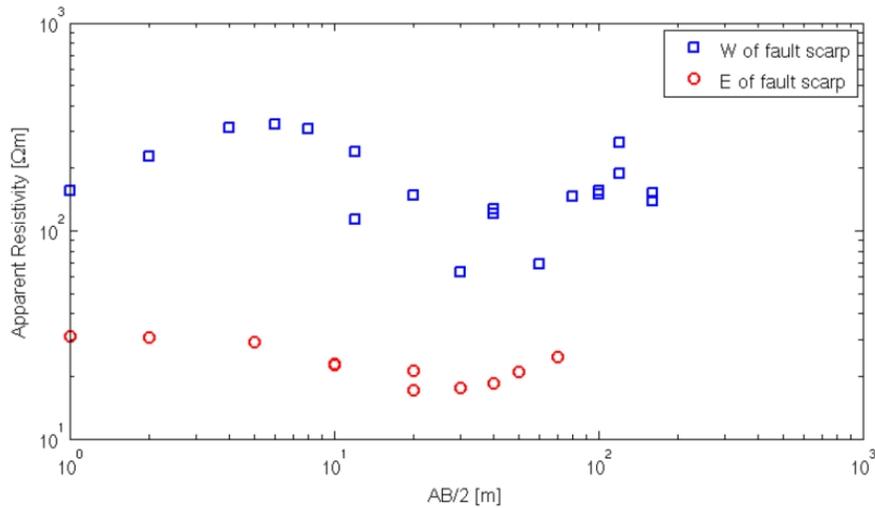


Figura 4.7: Resistividades aparentes observadas en SEV, Quebrada San Ramón (Díaz et al., 2014).

4.3 Velocidad sísmica de onda P

Entre Septiembre y Octubre de 2011 se midieron 4 perfiles sísmicos en el sector de la Quebrada de Macul (Figura 4.8). El objetivo de dichas mediciones fue detectar estructuras de pequeña escala (longitudes de onda menores a 500m) bajo uno de los escarpes de falla más jóvenes que ha sido reconocido (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011).

Tabla 4.4: Especificaciones de los perfiles sísmicos (modificada de Díaz et al., 2014)

| Perfil | Orientación | Largo (m) | Número de disparos | Espaciamiento entre geófonos (m) |
|--------|-------------|-----------|--------------------|----------------------------------|
| P1 | W-E | 269 | 27 | 5 y 10 |
| P2 | S-N | 388 | 17 | 10 |
| P3 | S-N | 373 | 17 | 10 |
| P4 | W-E | 271 | 17 | 5 |

Para la adquisición de datos sísmicos se utilizó un receptor GEODE de 24 canales, junto con geófonos verticales con frecuencia natural de 14Hz con espaciamentos entre 5 y 10m (detalle en Tabla 4.4) y la fuente sísmica que se usó fue un mazo golpeando sobre una esfera de hierro.

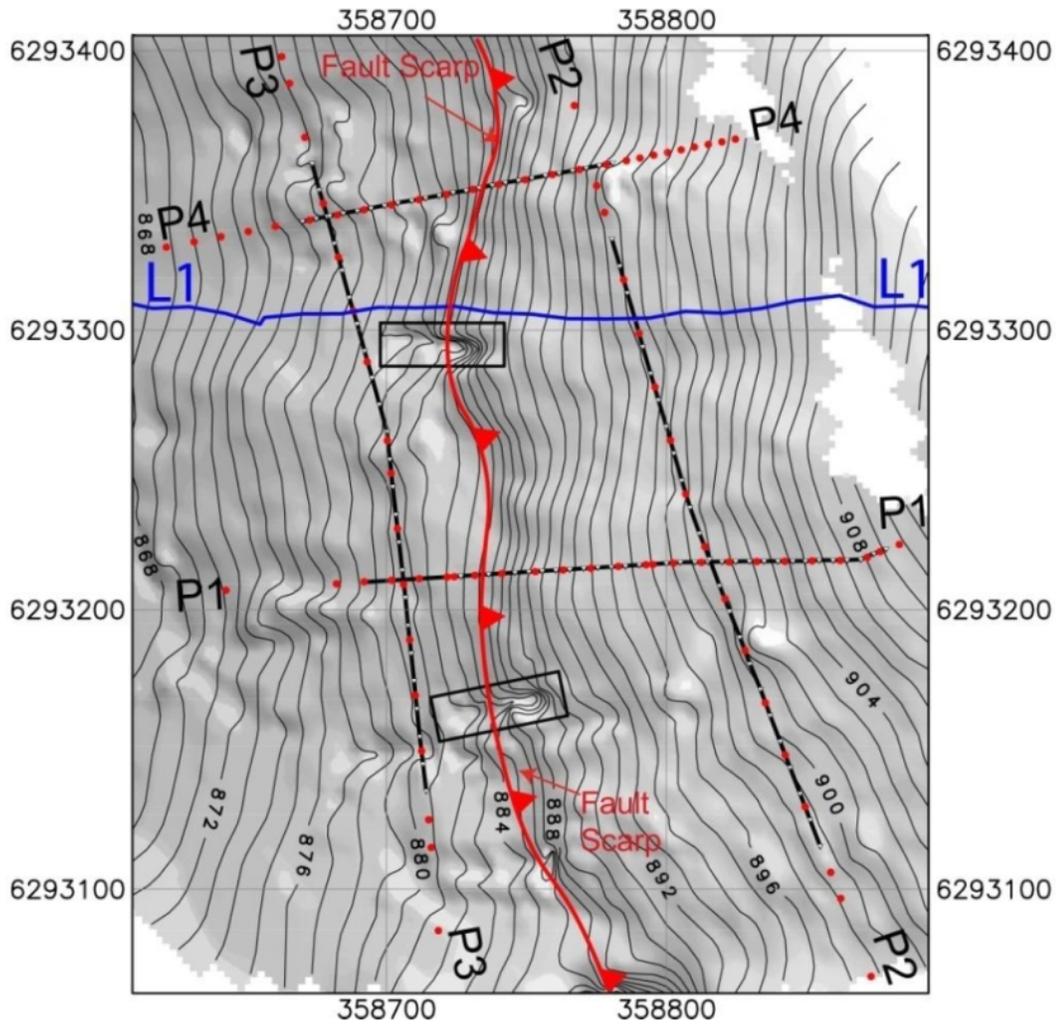
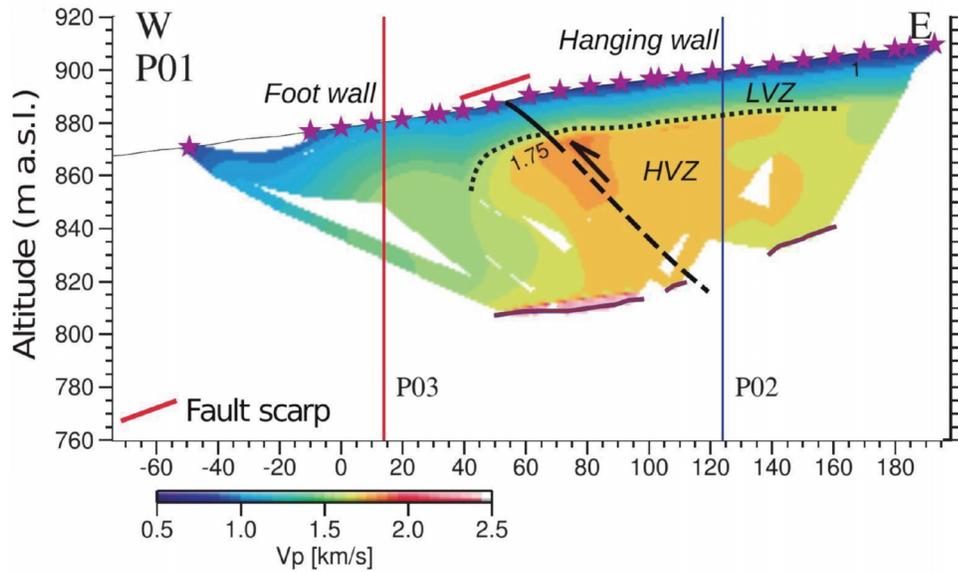


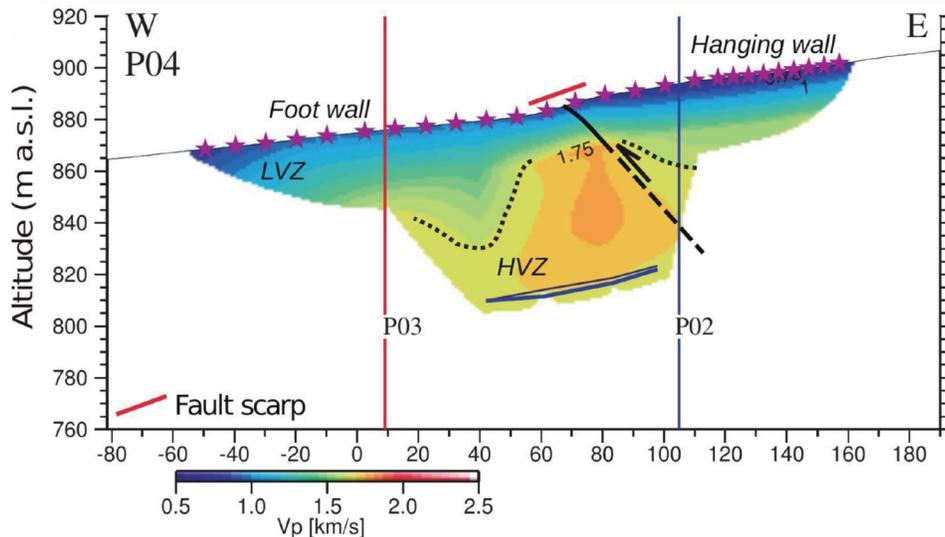
Figura 4.8: Ubicación de los perfiles sísmicos en el sector de Quebrada de Macul. L1 corresponde al perfil ERT Quebrada de Macul (Figura 4.3). En rectángulos negros, las trincheras excavadas. Sistema de coordenadas UTM zona 19S, WGS84. Imagen extraída de Díaz et al. (2014).

A partir de los datos sísmicos se obtuvo modelos de onda P (Figura 4.9), utilizando el método de inversión tomográfica conjunta de refracciones y reflexiones (Korenaga et al., 2000).

a)



b)



c)

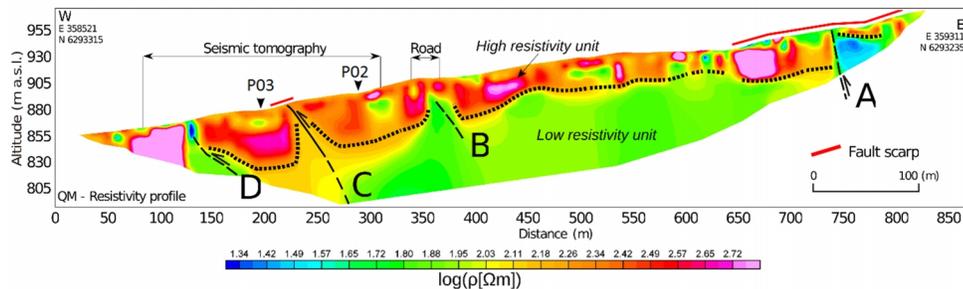


Figura 4.9: a) y b) Modelos de velocidad de onda P para los perfiles sísmicos P01 y P04, respectivamente, indicando donde cruzan los perfiles sísmicos P02 y P03. c) modelo ERT del perfil Quebrada de Macul, indicando la proyección de los perfiles sísmicos P01 y P04, y los puntos donde cruzan los perfiles sísmicos P02 y P03. (Modificado de Díaz et al., 2014).

Capítulo 5

Reproceso y modelamiento de datos ERT preexistentes

Los estudios geofísicos someros de la Falla San Ramón, o al menos los publicados hasta el momento, se acotan a los datos y resultados presentados en Díaz et al. (2014). En dicho estudio se presentan datos de ERT, SEV y estudios sísmicos de onda P. Una de las grandes ventajas de estos datos es la certeza de que se ubican sobre la traza de la falla, lo que permite correlacionar las anomalías observables y la estructura somera de la falla que es conocida, estudiada y descrita (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011; Vargas y Rebolledo, 2012; Vargas et al., 2014). Se reconoce entonces la importancia de incluir estos datos en el presente trabajo para su análisis e interpretación.

Es de particular interés la incorporación de los perfiles ERT medidos en 2012 por la empresa Wellfield, publicados por Díaz et al. (2014) y presentados en el capítulo 4 de esta tesis, puesto que son los únicos modelos de resistividad sobre la Falla San Ramón que se encuentran disponibles a la fecha. Las anomalías observadas en estos perfiles pueden representar una característica típica de la presencia somera de la falla, que podrían ser observables en nuevas mediciones en otros sectores.

En este trabajo de tesis el software utilizado para la inversión de datos es el DCIP2D v5.0, mientras que los modelos de Díaz et al. (2014) fueron obtenidos utilizando el software Res2DInv v3.58. En capítulos posteriores serán presentados y discutidos nuevos perfiles ERT adquiridos como parte de esta tesis; por lo tanto, es necesario reprocesar y modelar los perfiles ERT de Díaz et al. (2014) utilizando el software DCIP2D v5.0, a fin de poder integrar y comparar apropiadamente todos los modelos de resistividad.

5.1 Recopilación de datos ERT

5.1.1 Evaluación de los datos e información disponible

Asociado a los perfiles ERT adquiridos por Wellfield Services está el informe "Perfiles de resistividad eléctrica, sectores San Ramón y Quebrada de Macul". En dicho informe se presentan los parámetros de adquisición, especificaciones de los equipos utilizados, coordenadas referenciales de la ubicación de los perfiles y coordenadas detalladas de algunos de los electrodos. Además se incluye una descripción general del proceso e inversión de los datos y modelos de resistividad obtenidos, junto a una breve interpretación. También se proveen archivos con los datos observados en formato preparado para inversión.

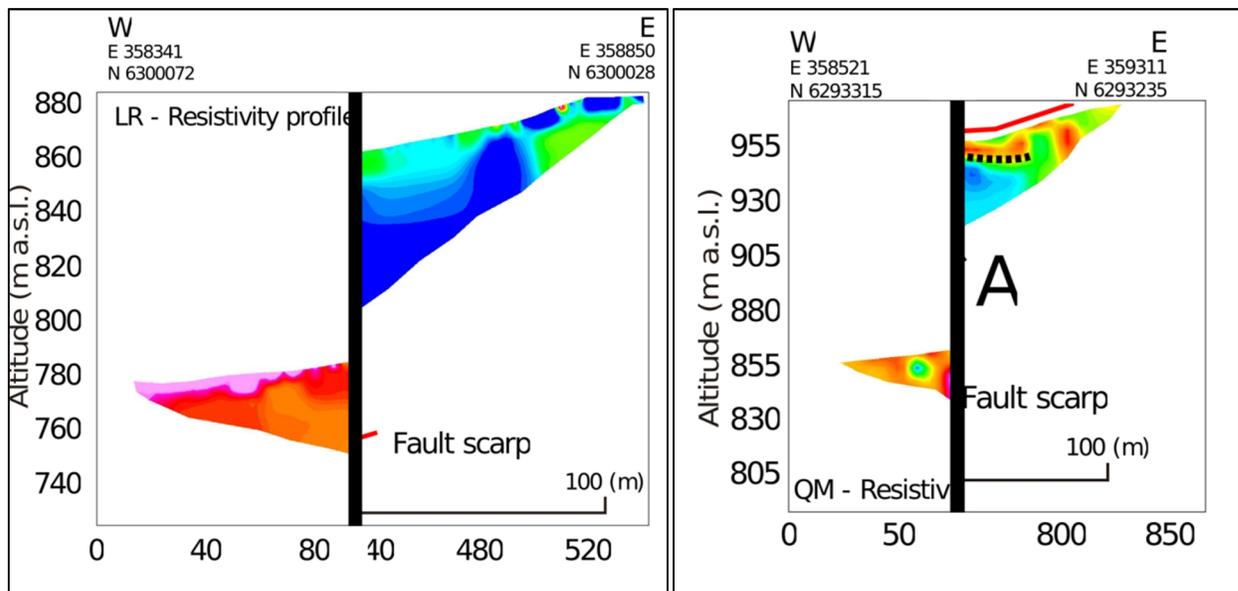


Figura 5.1: Extremos de los modelos de resistividad. Izquierda, perfil San Ramón. Derecha, perfil Quebrada de Macul. El eje inferior muestra la distancia en planta sobre cada perfil. Se aprecia que el largo en planta de cada perfil se encuentra por debajo del largo reportado, lo que indica que dicho largo reportado corresponde al largo en superficie y no a el largo en planta. Modificado de Díaz et al. (2014).

Examinando los archivos de datos observados, se aprecia que la ubicación reportada para la ubicación de los electrodos corresponde a la ubicación nominal (electrodos cada 7m), sin mención sobre si la distancia entre electrodos considerada para la inversión corresponde a la distancia en

superficie o proyectada en planta. A partir de las coordenadas extremas provistas para cada perfil (tablas 4.2 y 4.3) se observa que las distancias nominales, en planta y en superficie no coinciden, presentando diferencias que fluctúan entre 1,4% y 4,2% del largo nominal. Si bien no se explicita la forma de medir la distancia a lo largo del perfil (planta o superficie) para efectos de la inversión, las figuras de los modelos de resistividad indican que se habría utilizado el espaciamiento nominal medido sobre la superficie (Figura 5.1), supuesto que se mantendrá para futuros cálculos.

En relación a los datos de ubicación de los perfiles, se entrega la posición medida con GPS diferencial aproximadamente electrodo por medio, con la excepción de un segmento cercano a los 180m de largo en el perfil San Ramón, entre los electrodos 11 y 37 (70m y 252m sobre el perfil nominal, respectivamente), sobre el cual no se cuenta con ubicación.

5.1.2 Evaluación del proceso de inversión

Wellfield Services indica en su informe que se lograron procesos de inversión exitosos, con un error RMS de 3,7% para el perfil San Ramón y 2,8% para el perfil Quebrada de Macul, considerado como satisfactorio en el reporte; sin embargo, el nivel de ajuste logrado entre los datos medidos y la respuesta del modelo de resistividad debe ser considerado como apropiado o no en base al nivel de error presente en los datos originales.

En el capítulo 2 del presente trabajo se discute sobre el nivel de ajuste que se busca generar entre modelo y datos observados. Esto se debe a que un sobreajuste puede introducir artefactos matemáticos en el modelo al ajustar la parte errónea de los datos. Los errores observacionales para los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul no son reportados, por lo que no se tiene una real certeza del nivel de ajuste que los datos permiten sin entrar en un sobreajuste de las observaciones.

Los errores asociados a la adquisición de datos de resistividad aparente provienen de distintas fuentes. Entre las fuentes de error se encuentra el error producto del ruido ambiente, derivado de las variaciones naturales del campo eléctrico del suelo o proveniente de fuentes artificiales, también llamado "ruido cultural"; el error instrumental, estrechamente vinculado a la precisión y sensibilidad efectiva de los equipos utilizados, provisto que sean utilizados correctamente (el factor humano); y finalmente se encuentra el error que puede introducirse por las discrepancias entre la geometría real de

adquisición en terreno y la geometría considerada para el cálculo de los valores de resistividad aparente y en la inversión de datos.

Es, entonces, deseable contar con una estimación del nivel de error presente en los datos, de manera tal de buscar modelos con un nivel de error RMS que dé ciertas garantías de que no se está sobre o subajustando los datos observados. Debe tenerse presente que el nivel de error RMS es un valor global del modelo, por lo que no permite identificar cuáles son los datos o zonas del modelo con mejor o peor ajuste.

Entre las figuras incluidas en el informe se encuentra el llamado "Modelo de sensibilidad de los datos" (Figuras 5.2 y 5.3), que cuantifica la influencia de cada celda del modelo en la respuesta generada por dicho modelo (Ec. 2.27). Este modelo de sensibilidad se define como:

$$S(m) = (S_1, \dots, S_M) \quad (5.1)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^{i=N} J_{ii} = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\partial d_i}{\partial m_j} \quad (5.2)$$

Donde S_j es la sensibilidad acumulada de la j -ésima celda del modelo.

Entre mayor sea la sensibilidad acumulada de una celda, mayor influencia tiene en los valores de resistividad aparente calculados para el modelo. Esto es equivalente a decir que dicha celda es bien constreñida o muestreada por las mediciones de resistividad aparente. De esta forma, el modelo de sensibilidad permite identificar la confiabilidad de las distintas zonas del modelo.

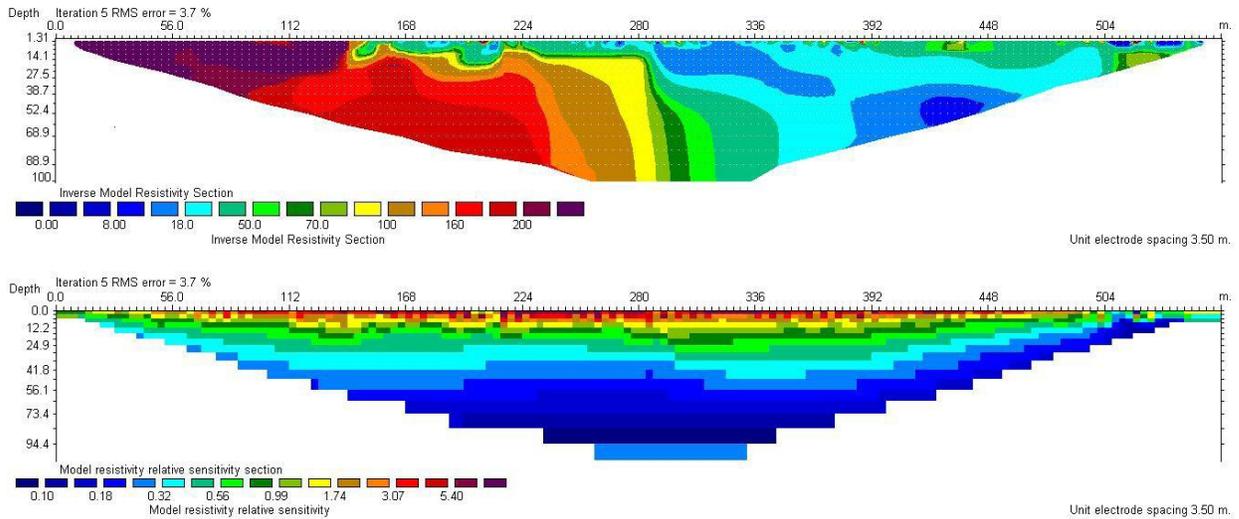


Figura 5.2: Modelo de resistividad (arriba) y modelo de sensibilidad (abajo) del perfil San Ramón, reportados por WellField Services.

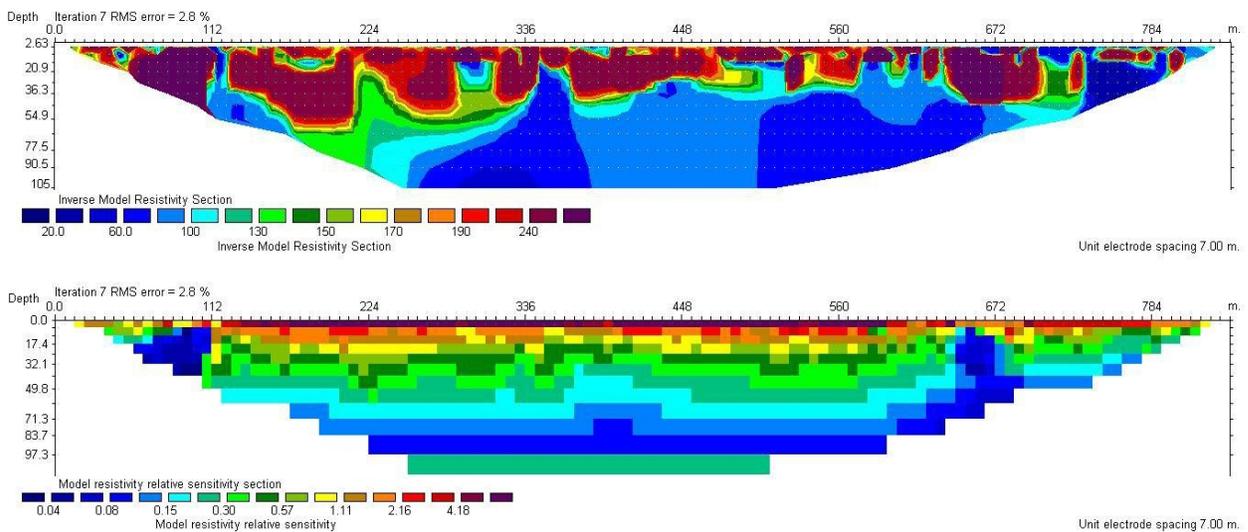


Figura 5.3: Modelo de resistividad (arriba) y modelo de sensibilidad (abajo) del perfil Quebrada de Macul, reportados por WellField Services.

5.2 Reproceso

Considerando la importancia de contar con modelos de resistividad confiables en las zonas donde se tiene certeza de su coincidencia con la traza de la Falla San Ramón, se estimó conveniente reprocesar y modelar los datos disponibles. El objetivo principal de este reproceso es identificar las posibles fuentes de error en los datos, estimar su magnitud y si es posible corregirlo;

en caso de no ser posible corregirlo, conocerlo y controlarlo, para incorporar dicho conocimiento en la interpretación de los modelos.

5.2.1 Ubicación y representación 2-D

Uno de los supuestos detrás del modelamiento 2-D de resistividades es que las variaciones de resistividad en la dirección perpendicular al perfil de adquisición son muy leves o inexistentes. En la práctica, este supuesto es muy difícil de cumplir a cabalidad, puesto que se desconoce a priori la estructura de resistividad del suelo, objetivo del estudio y modelamiento, pero sí es posible controlarlo, en parte, durante la etapa de diseño del perfil a medir.

En el proceso de modelamiento e inversión 2-D, los cálculos de resistividad aparente se realizan usando las posiciones horizontal y vertical indicadas para cada uno de los electrodos involucrados. Si bien la medición de resistividad aparente es una medición volumétrica que promedia los valores de resistividad del suelo, las posibles discrepancias que pueda haber en la ubicación real de los electrodos y la ubicación considerada en el modelamiento introducen error en el cálculo de las resistividades aparentes (Ecs. 2.11 y 2.12), puesto que las distancias entre electrodos pueden ser distorsionadas.

Esto último afecta la pertinencia de uno de los supuestos importantes dentro de la metodología de inversión de resistividad expuesta previamente, que el error de los datos no presenta correlación (Ec. 2.22 y párrafo posterior). El error introducido al utilizar una geometría incorrecta presentará correlación entre datos que compartan uno o más de los electrodos utilizados en la adquisición.

En el anexo I se presentan las coordenadas registradas para los electrodos de los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul, su posición nominal en planta y en superficie, la distancia acumulada sobre el perfil a partir de las coordenadas registradas y finalmente la distancia entre los electrodos por tramos. Examinando estos valores junto a aquellos entregados en las tablas 4.2 y 4.3, es evidente que existen diferencias en el largo total de los perfiles y el espaciamiento entre electrodos. La diferencia en el largo total de los perfiles alcanza el 2% en el perfil San Ramón y el 4% en el perfil Quebrada de Macul; sin embargo la mayor diferencia ocurre en el espaciamiento entre electrodos, en donde el espaciamiento real fluctúa entre la mitad y el doble del espaciamiento nominal (7m).

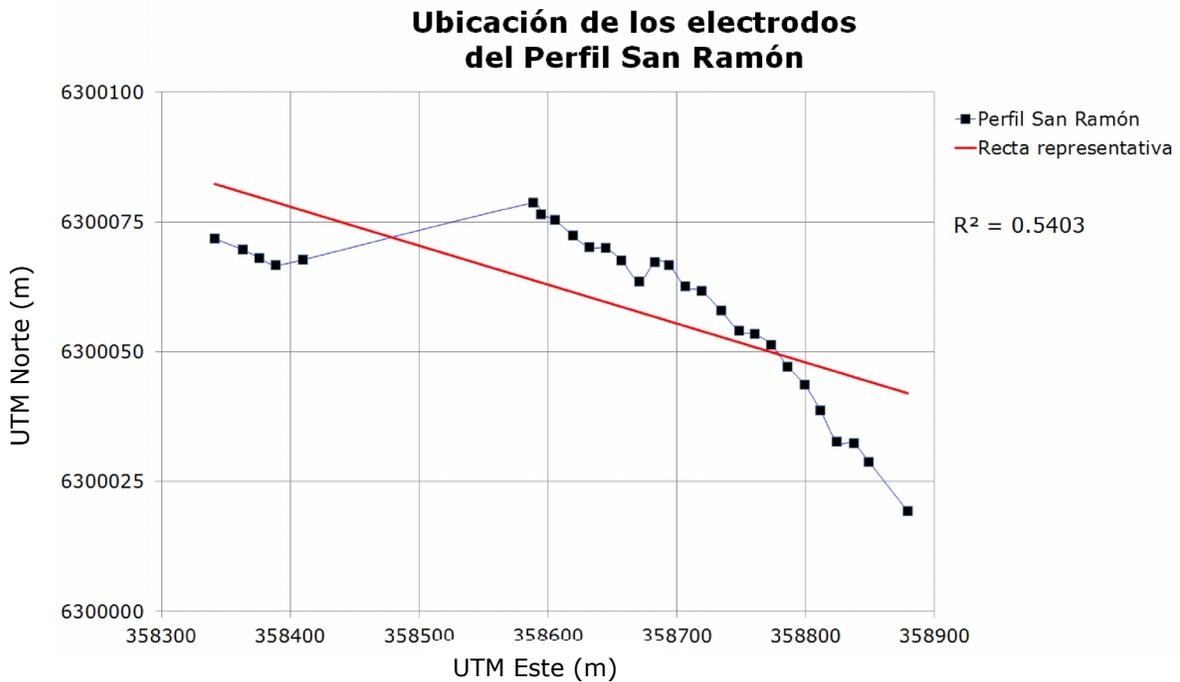


Figura 5.4: Electrodos del perfil San Ramón (línea azul, marcadores cuadrados negros) y la recta representativa de su ubicación (línea roja). El coeficiente de determinación R^2 ronda el 54%. Coordenadas en sistema UTM 19S, WGS84.

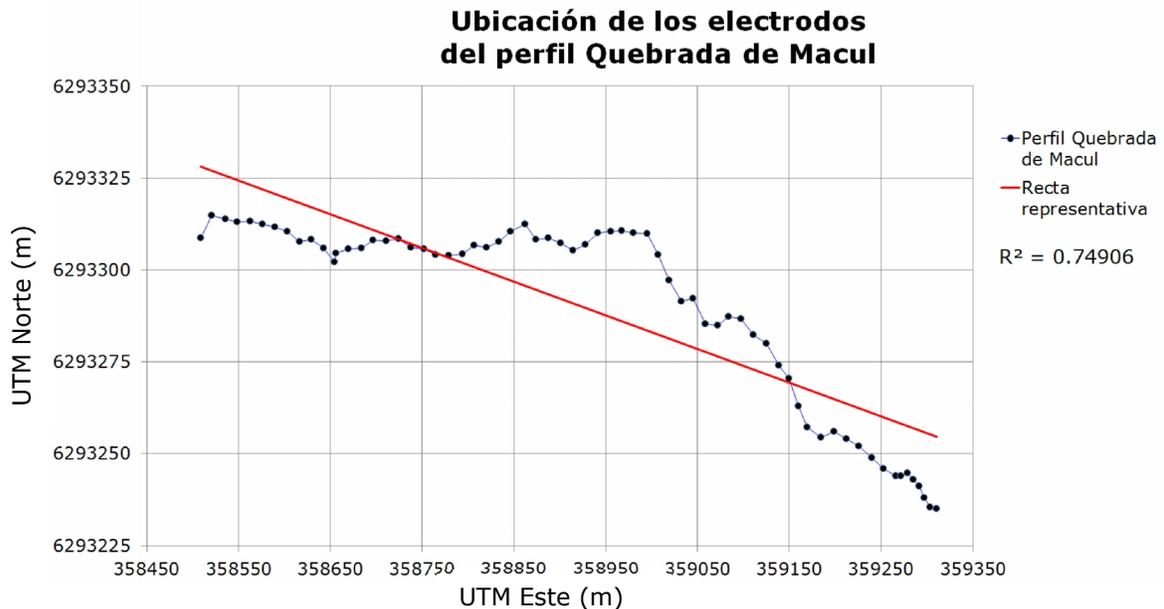


Figura 5.5: Electrodos del perfil Quebrada de Macul (línea azul y marcadores circulares negros) y la recta representativa de su ubicación (línea roja). El coeficiente de determinación R^2 ronda el 75%. Coordenadas en sistema UTM 19S, WGS84.

Una de las características del arreglo geométrico Wenner-Schlumberger, utilizado en la medición de los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul, es la co-linealidad de los electrodos. La representación en planta de los electrodos reportados para ambos perfiles hace evidente que esto no se cumple (Figuras 5.4 y 5.5). Esta discrepancia es apreciable gráficamente, y cuantificada por el coeficiente de determinación R^2 , un índice estadístico de la regresión lineal que cuantifica el nivel de ajuste entre la ubicación de los electrodos y sus respectivas rectas representativas.

Proyección de perfiles 2-D

Para la representación 2-D de los perfiles se tomó las rectas que mejor aproximan la ubicación reportada de los electrodos y se proyectó perpendicularmente su ubicación sobre dichas rectas. Esto hizo necesario estimar una ubicación para los electrodos sin coordenadas reportadas, lo que se hizo mediante interpolación lineal entre los puntos conocidos, tanto para las coordenadas en planta como la cota, a excepción del segmento sin datos en el perfil San Ramón, en el cual se siguió un procedimiento adicional para la estimación de cotas. Las coordenadas de las rectas representativas se entregan en la tabla 5.3.

Tabla 5.1: Coordenadas referenciales de los perfiles 2-D (UTM 19S, WGS84)

| | Inicio | | Fin | | Largo(m) |
|-------------------|-----------|------------|-----------|------------|----------|
| | Este (m) | Norte (m) | Este (m) | Norte (m) | |
| San Ramón | 358341.98 | 6300082.26 | 358880.76 | 6300041.96 | 540.25 |
| Quebrada de Macul | 358510.86 | 6293328.04 | 359312.60 | 6293254.45 | 805.11 |

Segmento sin coordenadas, perfil San Ramón

El segmento sin coordenadas en el perfil San Ramón requirió de un trato especial para la estimación de cotas. A lo largo de este segmento tiene lugar un cambio en la pendiente de la elevación, por lo que se optó por reemplazar las cotas que resultantes de la interpolación lineal por cotas extraídas de un modelo de elevación digital (Figura 5.6). El modelo de elevación elegido fue el Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model Version 2 (ASTER GDEM v2), propiedad del Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

El procedimiento seguido para obtener las cotas fue el siguiente:

- 1) Se interpoló linealmente la ubicación en planta de los electrodos en este segmento.
- 2) Para las coordenadas calculadas se extrajo su cota correspondiente en el modelo ASTER GDEM v2.
- 3) Se niveló las cotas extraídas por igualación a las medidas en terreno en los electrodos 11 y 37. La nivelación se hizo considerando una tendencia lineal.

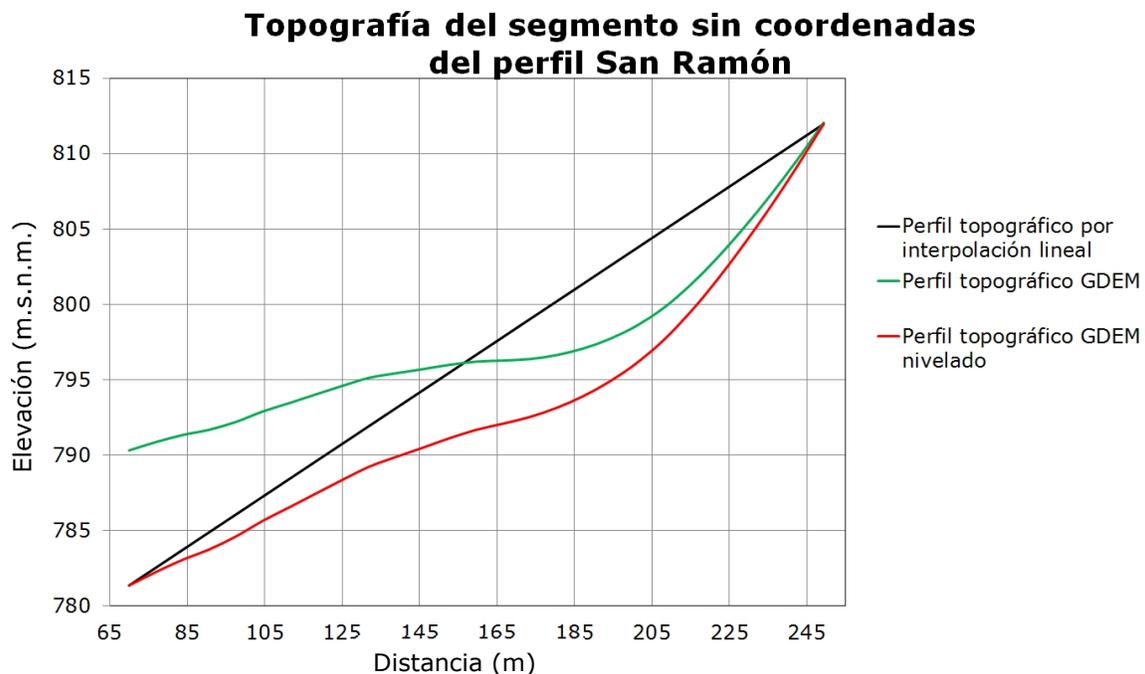


Figura 5.6: Perfiles topográficos en el segmento sin coordenadas sobre la posición nominal en planta.

El perfil de elevación obtenido muestra buena correlación con lo observado en la zona, reproduciendo correctamente los cambios de pendiente, además de ajustarse de buena forma con las pendientes observadas antes y después del segmento sin datos de posición (Figura 5.7).

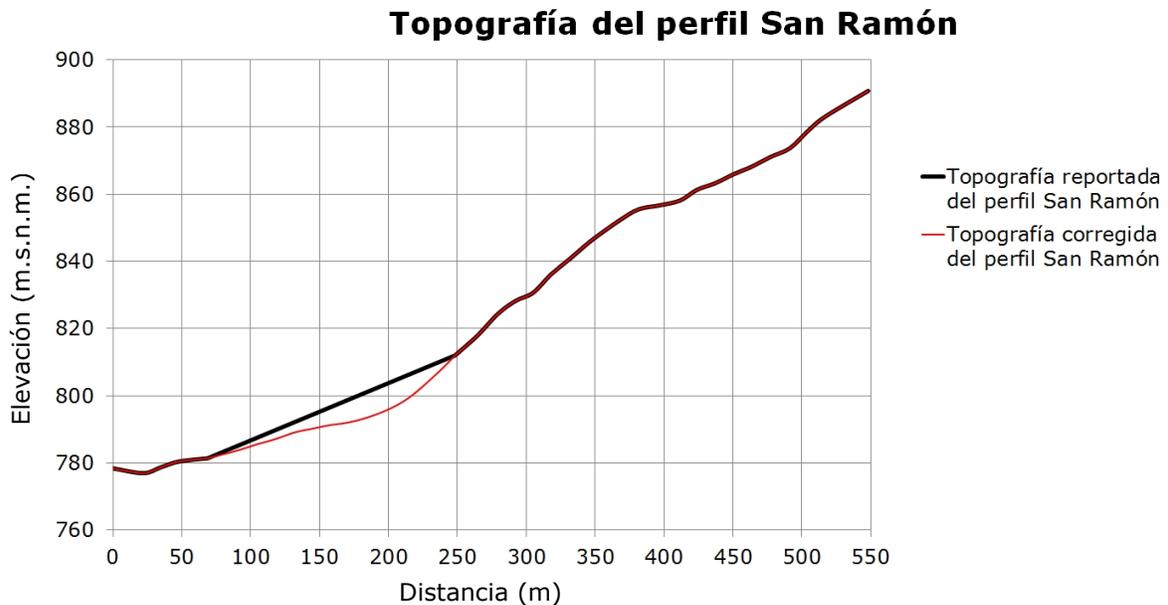


Figura 5.7: Topografía del perfil San Ramón. Se aprecia como la topografía previamente interpolada entre los 80m y 250m del perfil no representaba correctamente las inflexiones del terreno.

5.2.2 Resistividad 3-D

La resistividad aparente se calcula en base a la corriente eléctrica inyectada, el voltaje medido y la geometría de los electrodos, por lo tanto, la corrección en la geometría de los electrodos conlleva un cambio en las resistividades aparentes obtenidas.

En el presente caso, las correcciones y cambios en la geometría son de 2 tipos. En un primer paso se ha considerado la posición y espaciamientos reales de los electrodos, mientras que en un segundo paso se han proyectado a un perfil 2-D representativo.

El primer paso, considerar la posición y espaciamientos reales de los electrodos, tiene como consecuencia directa que las resistividades aparentes calculadas sean las correctas, al no haber error en las ubicaciones relativas entre electrodos (Ec. 2.11); sin embargo, la falta de linealidad de los perfiles hace que los valores de resistividad aparente obtenidos sean representativos de un volumen con una componente importante en la dirección perpendicular al perfil. Como el modelamiento 2-D asume que las variaciones de resistividad perpendicular al perfil son inexistentes o muy leves, se debe

considerar esta nueva resistividad aparente, calculada tridimensionalmente, como la resistividad aparente a respetar en la proyección 2-D.

En la práctica, lo que se mide en el terreno es la corriente inyectada y el voltaje generado por esta corriente. En particular, el software de inversión utilizado en este trabajo, DCIP2D v5.0, utiliza como parámetros de entrada la ubicación de los electrodos y el voltaje generado normalizado, por lo que para mantener la resistividad aparente luego del segundo paso, la proyección 2-D sobre el perfil representativo, es necesario calcular un voltaje equivalente al pasar de la situación 3-D a 2-D.

El voltaje 2-D equivalente (V_{MN}^{2D}) para la resistividad aparente 3-D (ρ_a^{3D}) se obtiene de la siguiente forma:

$$V_{MN}^{2D} = \frac{\rho_a^{3D} I}{K_{3D}} \quad (5.3)$$

En donde K_{3D} es el factor geométrico de la geometría real (Ec. 2.13).

El cambio en las resistividades aparentes generado a partir de utilizar en su cálculo la geometría correcta es de un 7,8% promedio, con una desviación estándar del 12,7%, siendo el cambio más extremo de un 61,5%. Esto indica que, en promedio, el error en las observaciones producto de considerar una geometría incorrecta en el modelamiento e inversión es de un 7,8%, por lo que un modelo cuyo ajuste RMS sea menor a dicho valor incurrirá en sobreajuste de las observaciones y estará, probablemente, introduciendo artefactos matemáticos derivados del error en la geometría considerada.

Pseudosecciones de Resistividad Aparente

En primer orden, las pseudosecciones de resistividad aparente obtenidas utilizando la ubicación nominal y corregida de los electrodos muestran rasgos generales similares (Figuras 5.8 y 5.9). Se observan diferencias de segundo orden, tanto en la magnitud como en la ubicación de algunas anomalías menores. Sin embargo, al graficar la diferencia porcentual (Figura 5.10) entre ambas secciones, es patente que el error producto de la geometría de los electrodos presenta correlación espacial, es decir, al corregir la posición de un electrodo los datos presentan errores con sentidos opuestos a un lado

y otro de dicho electrodo, lo que pudo haber afectado los resultados de la inversión efectuada por Wellfield Services.

Para la construcción de las pseudosecciones se consideró una pseudoprofundidad de 0.3 veces la separación entre los electrodos de inyección de corriente, y para la ubicación a lo largo del perfil se consideró el promedio de las coordenadas de los electrodos de corriente y potencial. Este valor corresponde a un promedio aproximado del factor de profundidad de investigación de los distintos arreglos geométricos utilizados en la adquisición de los datos trabajados en esta tesis (Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo). Los valores correspondientes para cada arreglo pueden ser encontrados en el trabajo de Edwards (1977).

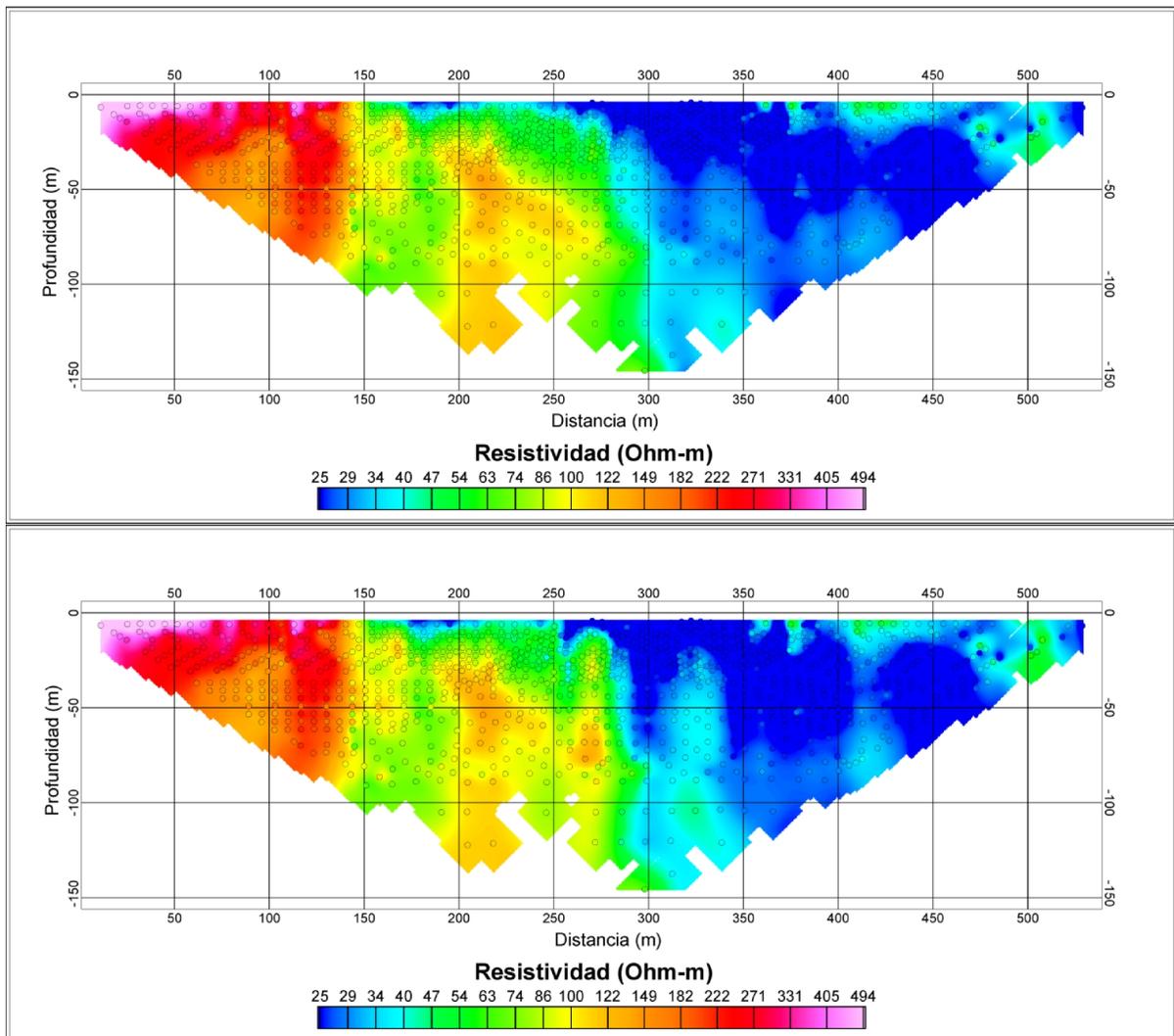


Figura 5.8: Resistividad aparente del perfil San Ramón; arriba, utilizando la ubicación nominal de electrodos; abajo, utilizando la ubicación corregida. Se aprecia un fuerte contraste entre los valores de resistividad aparente antes y después de los 280m del perfil, aproximadamente.

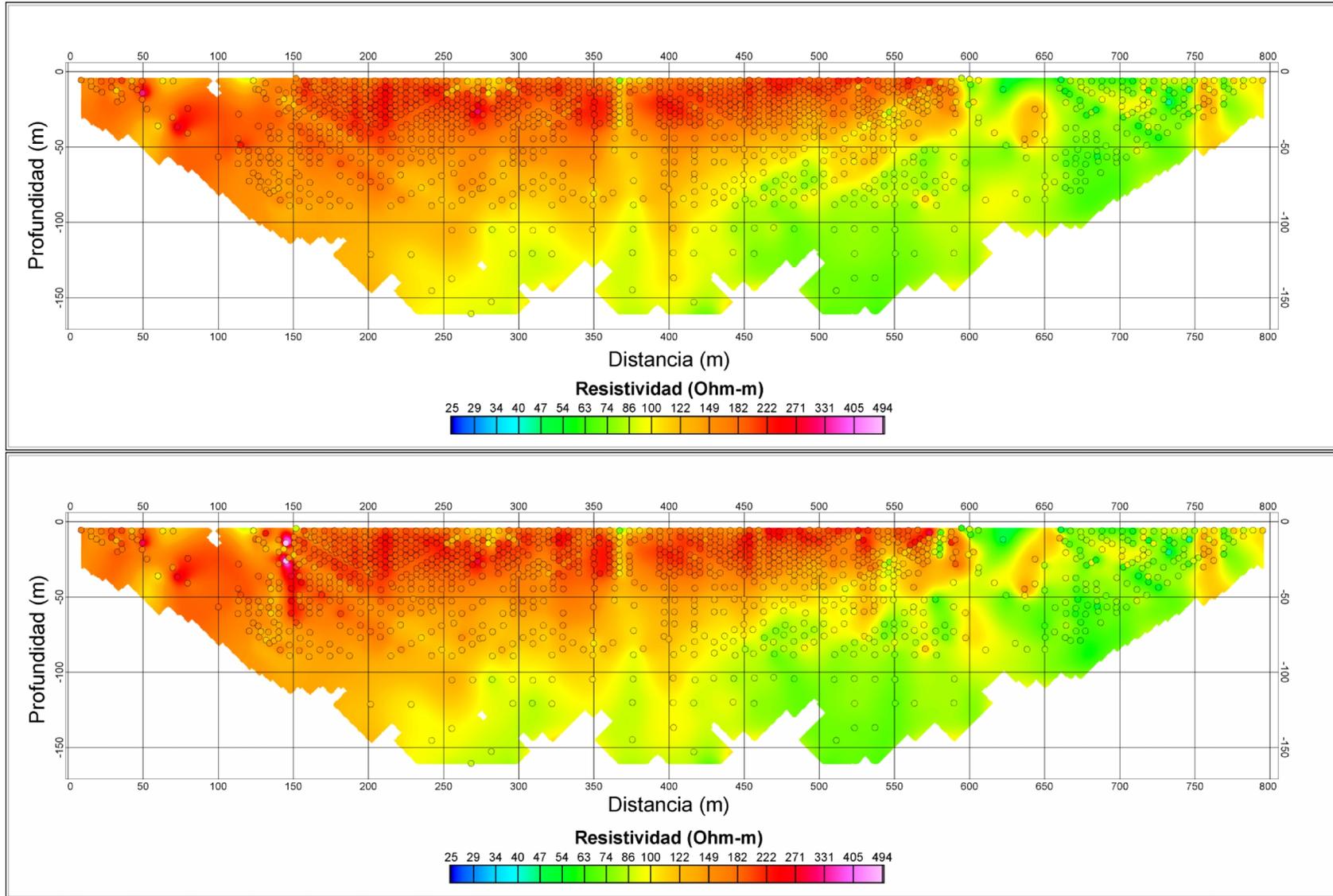


Figura 5.9: Resistividad aparente del perfil Quebrada de Macul; arriba, utilizando la ubicación nominal de electrodos; abajo, utilizando la ubicación corregida. En general se observa una disminución de los valores de resistividad aparente en profundidad, mientras que en superficie los valores disminuyen a partir de los 600m.

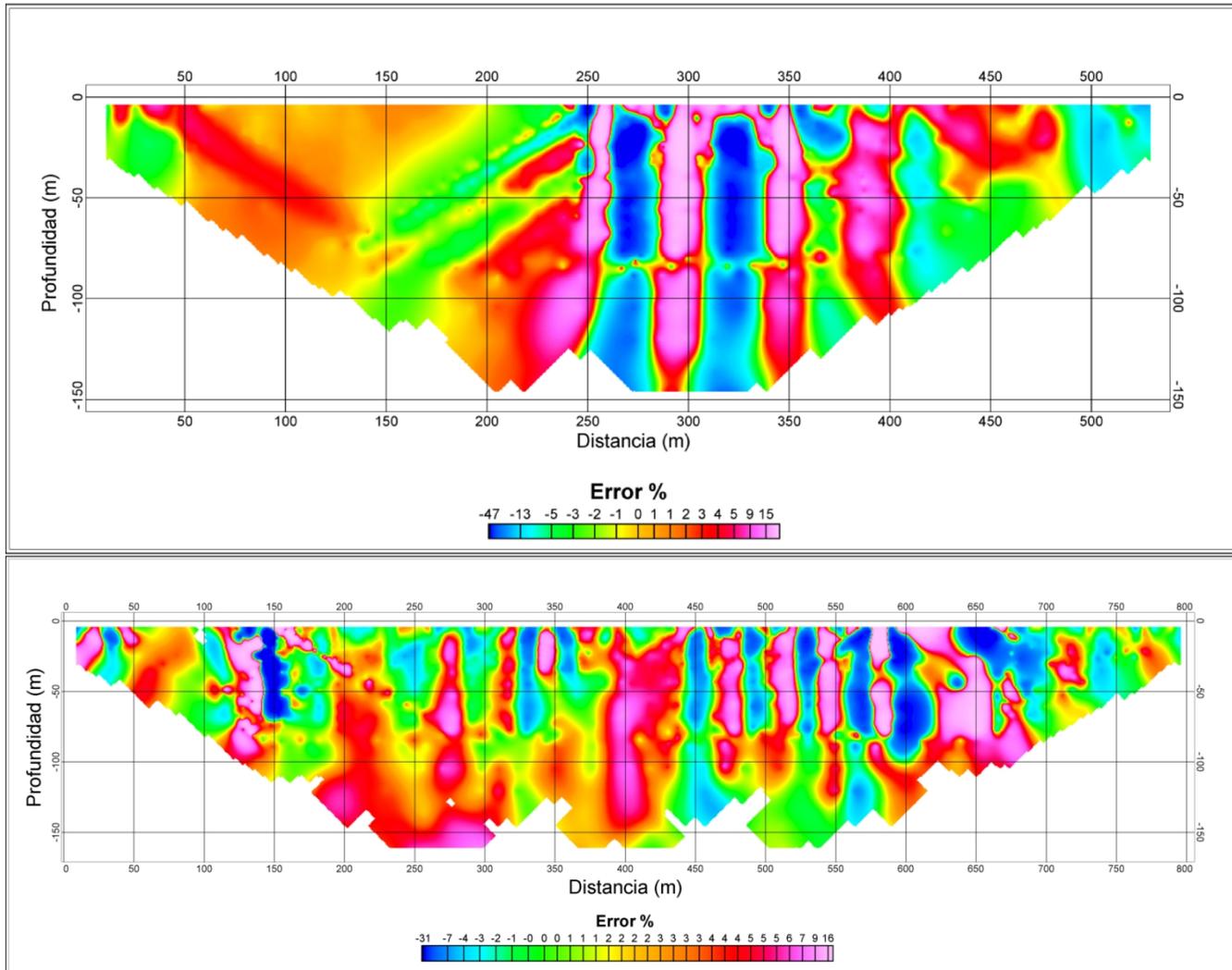


Figura 5.10: Error porcentual entre las resistividades aparentes calculadas con la ubicación nominal y la ubicación corregida de los electrodos, presentadas en las figuras 5.8 y 5.9. Arriba, para el perfil San Ramón; abajo, para el perfil Quebrada de Macul. La correlación espacial del error se evidencia en la alternancia de signo de los errores a lo largo del perfil. La corrección de ubicación de un electrodo genera cambios de signo opuestos entre dipolos aledaños que compartan dicho electrodo.

5.3 Modelo de inversión

Utilizando el set de datos corregidos se realizó una nueva inversión de los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul. Para esto fue utilizado el software de modelamiento directo e inversión de datos de resistividad DCIP2D, cuya metodología básica de inversión se explica en el capítulo 2 de este trabajo y en mayor detalle en el trabajo de Oldenburg et al. (1993).

El error asociado a los datos es, en la práctica, desconocido. Las estimaciones de error suelen estar vinculadas a una repetición de las mediciones hasta lograr que el promedio de los valores obtenidos cumpla cierto umbral de desviación estándar. Como no se cuenta con dicha estimación de error se asignó un error base idéntico para todos los datos de cada perfil se asignó a los datos de ambos perfiles un 6% de error. El desarrollador de la rutina de inversión utilizada (DCIP2D) en sus manuales recomienda asignar un 5%, valor que se ha ocupado como base para los datos de este estudio, pero en el caso de los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul se les ha añadido un 1% adicional para tomar en cuenta la falta de linealidad en la ubicación de los electrodos.

La grilla utilizada en la inversión del perfil San Ramón consta de 104100 celdas de aproximadamente 2m de largo por 0.8m de altura (Figura 5.11), donde 78066 de ellas corresponden a celdas activas en las cuales se lleva a cabo inversión. Para el perfil Quebrada de Macul el número total de celdas fue 131430 con 103063 de ellas activas, con un tamaño aproximado de 2.2m de largo por 0.9m de alto (Figura 5.11).

Asociado al modelo de resistividad invertido, se generó el modelo de sensibilidad (Anexo II), el cual permite cuantificar la influencia de cada celda del modelo en el ajuste de los datos. Esto es análogo a decir que tan bien constriñen el conjunto de datos a cada celda del modelo.

Los modelos de resistividad resultantes de la inversión de los datos corregidos se presentan en las figuras 5.12 y 5.13. El modelo de sensibilidad fue utilizado para definir la profundidad hasta la cual los modelos de resistividad se consideran representativos de los datos, fijándose como límite el 50% más sensible del total de celdas que componen cada modelo.

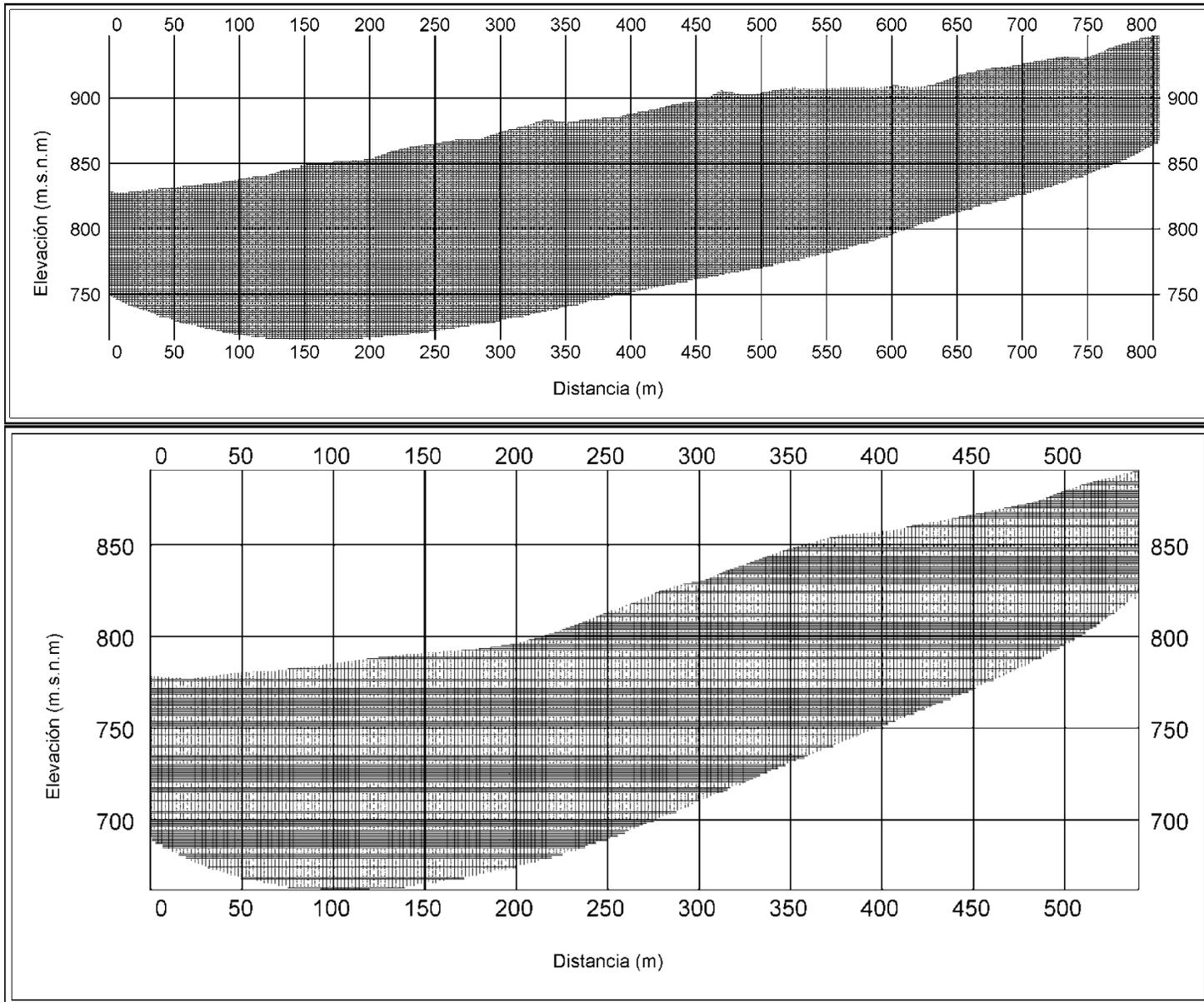


Figura 5.11: Arriba, la grilla utilizada en el perfil Quebrada de Macul. Abajo, la grilla del perfil San Ramón.

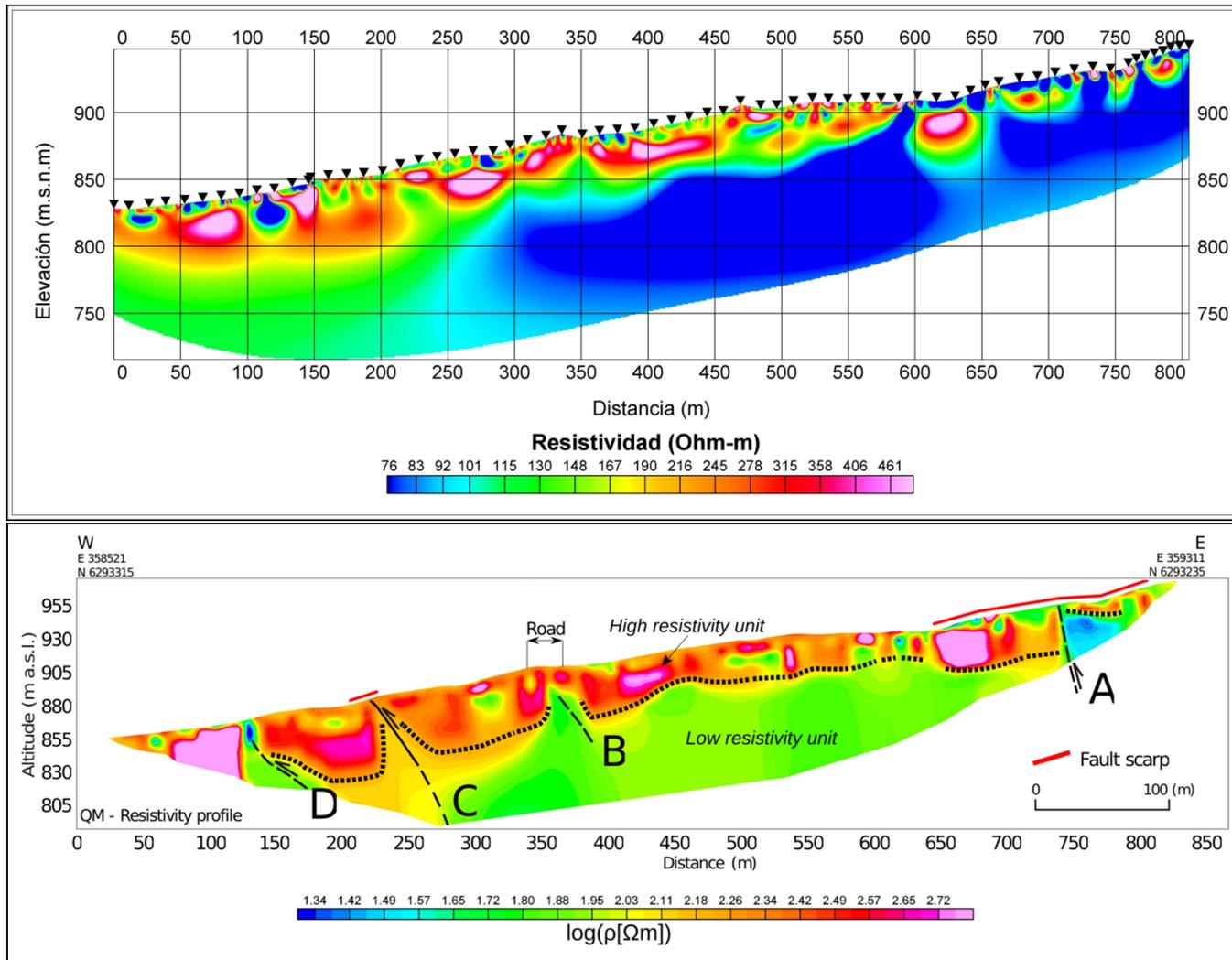


Figura 5.12: Arriba, modelo de resistividad del perfil Quebrada de Macul, donde los triángulos negros invertidos marcan la posición de los electrodos a lo largo del perfil. Abajo, modelo de resistividad de Díaz et al. (2014). Se observa una diferencia importante en la profundidad representada en cada modelo. El software Res2Dinv v3.58 utilizado en el modelo de Díaz et al. (2014) determina la profundidad representada utilizando los criterios geométricos establecidos por Edwards (1977).

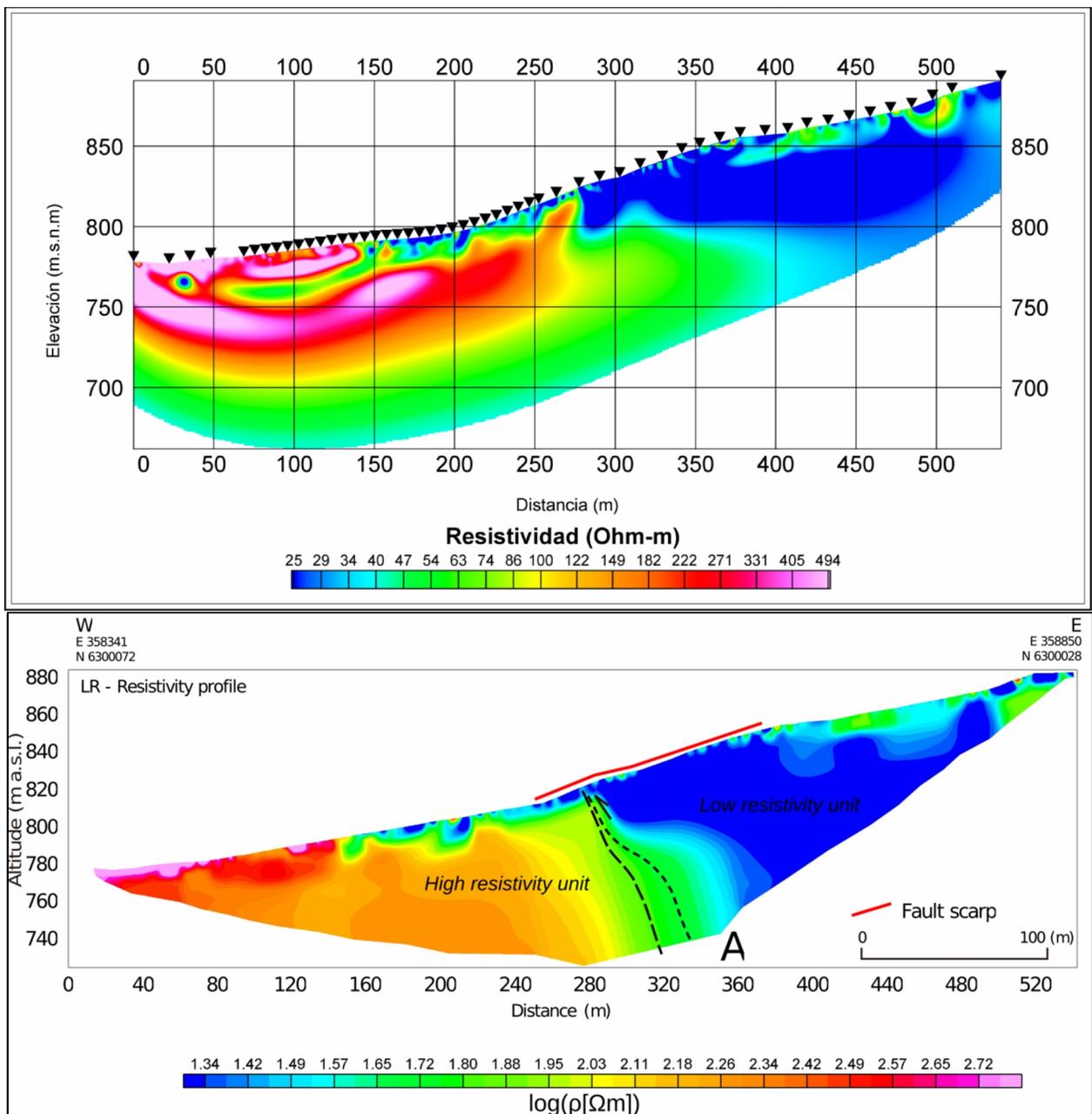


Figura 5.13: Arriba, modelo de resistividad del perfil San Ramón, donde los triángulos negros invertidos marcan la posición de los electrodos a lo largo del perfil. Abajo, modelo de resistividad de Díaz et al. (2014). Se observa una diferencia importante en la profundidad representada en cada modelo. El software Res2Dinv v3.58 utilizado en el modelo de Díaz et al. (2014) determina la profundidad representada utilizando los criterios geométricos establecidos por Edwards (1977).

Capítulo 6

Adquisición, proceso y modelamiento de perfiles ERT propios

6.1 Adquisición de datos

Como parte del presente trabajo se llevó a cabo la adquisición de dos perfiles ERT, situados en distintos sectores en los cuales se cuenta con una ubicación inferida para la traza de la Falla San Ramón. Los sectores elegidos corresponden al Parque Monseñor Escrivá de Balaguer, en la comuna de Vitacura (Figura 6.1), y el Bosque El Panul, en la comuna de La Florida (Figura 6.2).

Para la adquisición de datos se utilizó un equipo Iris Syscal Pro-Switch 48 (<http://www.iris-instruments.com>) en conjunto con dos cables multielectrodos de 24 salidas, totalizando 48 electrodos simultáneos en terreno en todo momento.

6.1.1 Parque Monseñor Escrivá de Balaguer

El perfil adquirido en el Parque Monseñor Escrivá de Balaguer, ubicado en la comuna de Vitacura, Santiago, fue denominado el perfil Escrivá. La toma de datos se efectuó en dos campañas. La primera se realizó el día 11 de Febrero de 2014, en la cual se adquirieron los dos primeros tendidos, mientras que en la segunda campaña, realizada el día 27 de Noviembre de 2014, se adquirió un tercer tendido. Este último tendido sirvió de traslape entre los dos primeros, a fin de completar los datos en una pseudosección con mayor continuidad. Las coordenadas referenciales de los tres tendidos se encuentran en la tabla 6.1.



Figura 6.1: Ubicación del perfil ERT Escrivá. Las líneas en color amarillo y azul corresponden al 1er y 2do tendido, medidos en la primera campaña. En color rojo la ubicación del 3er tendido. En naranja la traza inferida de la Falla San Ramón.

Tabla 6.1: Coordenadas referenciales del perfil Escrivá (UTM 19S, WGS84)

| N° de Tendido | Coordenadas del punto inicial | | Coordenadas de punto final | |
|---------------|-------------------------------|---------|----------------------------|---------|
| | Este | Norte | Este | Norte |
| 1er Tendido | 355704 | 6305969 | 355934 | 6306045 |
| 2do Tendido | 355926 | 6306042 | 356167 | 6306046 |
| 3er Tendido | 355783 | 6306011 | 356010 | 6306068 |

Tabla 6.2: Parámetros del perfil Escrivá

| | |
|--|-------------------------------------|
| Espaciamiento entre electrodos (nominal) | 5m |
| Número de posiciones de electrodos | 141 |
| Largo nominal | 460m |
| Largo efectivo | 466m |
| Número de tendidos realizados | 3 |
| Arreglo Geométrico utilizado | Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger |

En la zona de trabajo la pendiente topográfica observada es baja y constante o casi constante, por lo que se optó por georreferenciar el perfil sólo con las coordenadas en planta iniciales y finales de cada tendido, sin cota, dado que las condiciones de pendiente permiten modelar asumiendo una topografía plana. En cuanto a los parámetros de adquisición, estos se encuentran detallados en la tabla 6.2.

6.1.2 Bosque El Panul

El perfil adquirido en el Bosque El Panul, ubicado en la comuna de La Florida, Santiago, fue denominado perfil Panul. La toma de datos se llevó a cabo en dos campañas. En la primera campaña llevada a cabo el día 7 de Mayo de 2014, se adquirieron datos sobre un primer tendido, el que fue complementado en una segunda campaña el día 18 de Agosto de 2014 con dos tendidos adicionales.

La zona de trabajo presenta una pendiente topográfica importante, por lo que se determinaron las coordenadas de la mayor parte de los electrodos utilizando GPS diferencial. Las coordenadas referenciales de la ubicación de los tendidos se entregan en la tabla 6.3, y los parámetros de adquisición se detallan en la tabla 6.4.

Tabla 6.3: Coordenadas referenciales del perfil Panul (UTM 19S, WGS84)

| N° de tendido | Coordenadas del punto inicial | | | Coordenadas del punto final | | |
|---------------|-------------------------------|---------|--------|-----------------------------|---------|--------|
| | Este | Norte | Cota | Este | Norte | Cota |
| 1er tendido | 358300 | 6289041 | 942.60 | 358459 | 6288869 | 965.85 |
| 2do tendido | 358378 | 6288949 | 956.99 | 358544 | 6288785 | 970.52 |
| 3er tendido | 358464 | 6288867 | 966.97 | 358635 | 6288733 | 985.08 |

En la adquisición de este perfil se utilizaron dos arreglos geométricos distintos. En esta zona se disponía de espacio suficiente para desplegar un polo de corriente en el "infinito", pudiéndose entonces configurar además de un arreglo Dipolo-Dipolo uno adicional Polo-Dipolo. El infinito fue desplegado en forma tal que su distancia mínima a los electrodos fuera superior al espaciamiento máximo entre el polo de inyección de corriente en la línea y el dipolo de recepción de voltaje. En cualquier caso, en el cálculo de

resistividades aparentes se tomó en cuenta la ubicación relativa del polo en el infinito, de forma tal de corregir el posible efecto que pudiese haber generado en los datos.

Tabla 6.4: Parámetros del perfil Panul

| | |
|--|-----------------------------|
| Espaciamiento entre electrodos (nominal) | 5m |
| Número de posiciones de electrodos (nominal) | 96 |
| Largo nominal | 475m |
| Largo efectivo | 454.5m |
| Número de tendidos realizados | 3 |
| Traslape entre tendidos | 115m / 24 electrodos |
| Arreglos Geométricos utilizados | Polo-Dipolo y Dipolo-Dipolo |

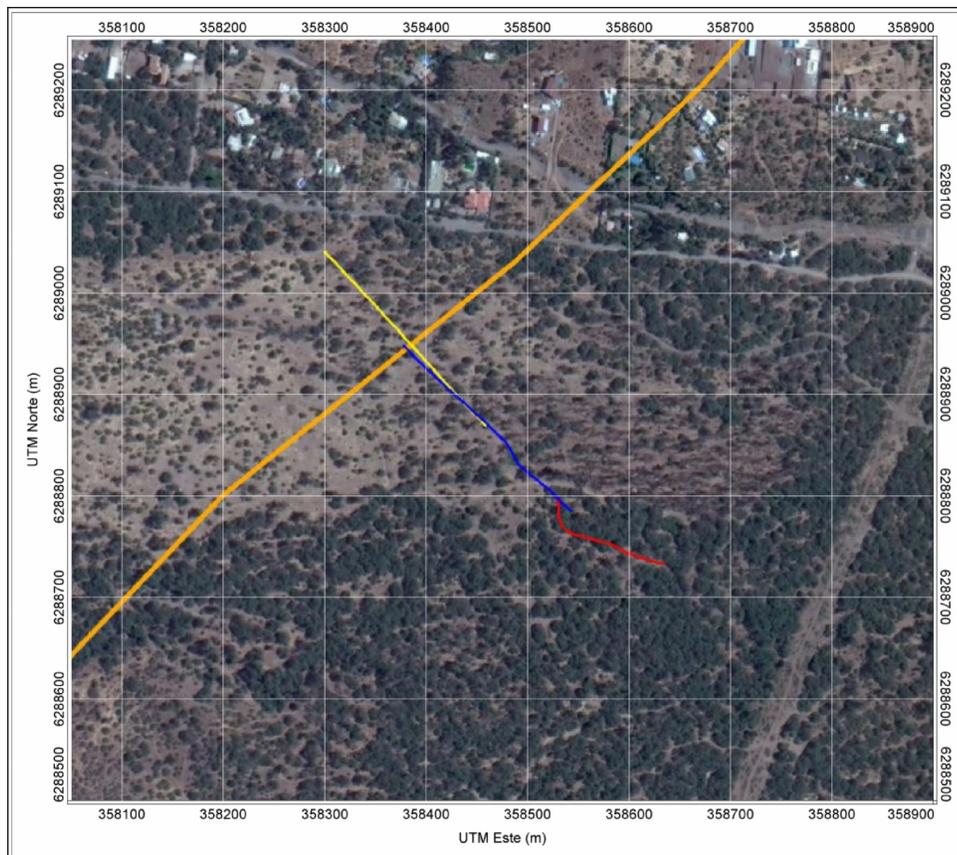


Figura 6.2: Ubicación del perfil Panul. La línea amarilla corresponde al 1er tendido, adquirido en la primera campaña. En la segunda campaña se adquirieron el 2do y 3er tendido (azul y rojo, respectivamente). El 3er tendido ingresa en vegetación más densa, lo que impide la disposición lineal de los electrodos. En naranjo la traza inferida de la Falla San Ramón.

6.2 Proceso

6.2.1 Ubicación y representación 2-D

Los tendidos que conforman el perfil Escrivá se alejan considerablemente de la colinealidad, por lo que fue necesario corregir la ubicación de los electrodos y proyectar su ubicación sobre una recta representativa (recta roja en figura 6.3 y sus coordenadas en tabla 6.5), siguiendo el mismo procedimiento utilizado para los perfiles Quebrada de Macul y San Ramón.

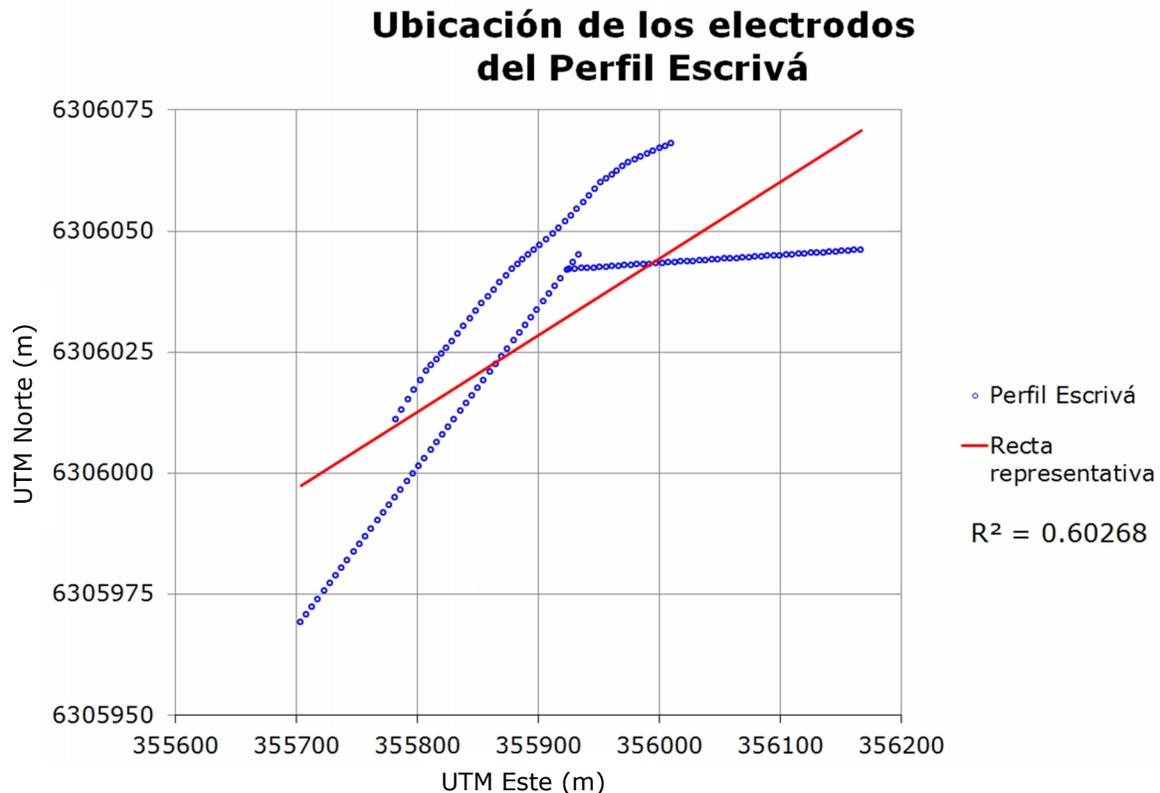


Figura 6.3: Círculos azules representan los electrodos del perfil Escrivá y en rojo la recta representativa de ellos. El coeficiente de determinación R^2 llega al 60%. Coordenadas en sistema UTM 19S, WGS84.

El coeficiente de determinación de la recta representativa alcanza el 60%, siendo disminuido principalmente por la distancia del 3er tendido con los dos anteriores, a pesar de seguir el rumbo de la tendencia de dichos tendidos.

Tabla 6.5: Coordenadas referenciales del perfil Escrivá 2-D (UTM 19S, WGS84)

| Inicio | | Fin | |
|--------|---------|--------|---------|
| Este | Norte | Este | Norte |
| 355700 | 6305997 | 356163 | 6306070 |

En el perfil Panul la vegetación de la zona impidió que el tercer tendido se dispusiera de forma perfectamente lineal (figura 6.4), por lo que se siguió el mismo procedimiento que para los perfiles anteriores, definiendo la recta que mejor aproxima las ubicaciones de los electrodos (recta roja en figura 6.4 y sus coordenadas en tabla 6.6) y proyectando los electrodos sobre esta recta, la que logra un valor para el coeficiente de determinación R^2 superior al 98% (figura 6.4).

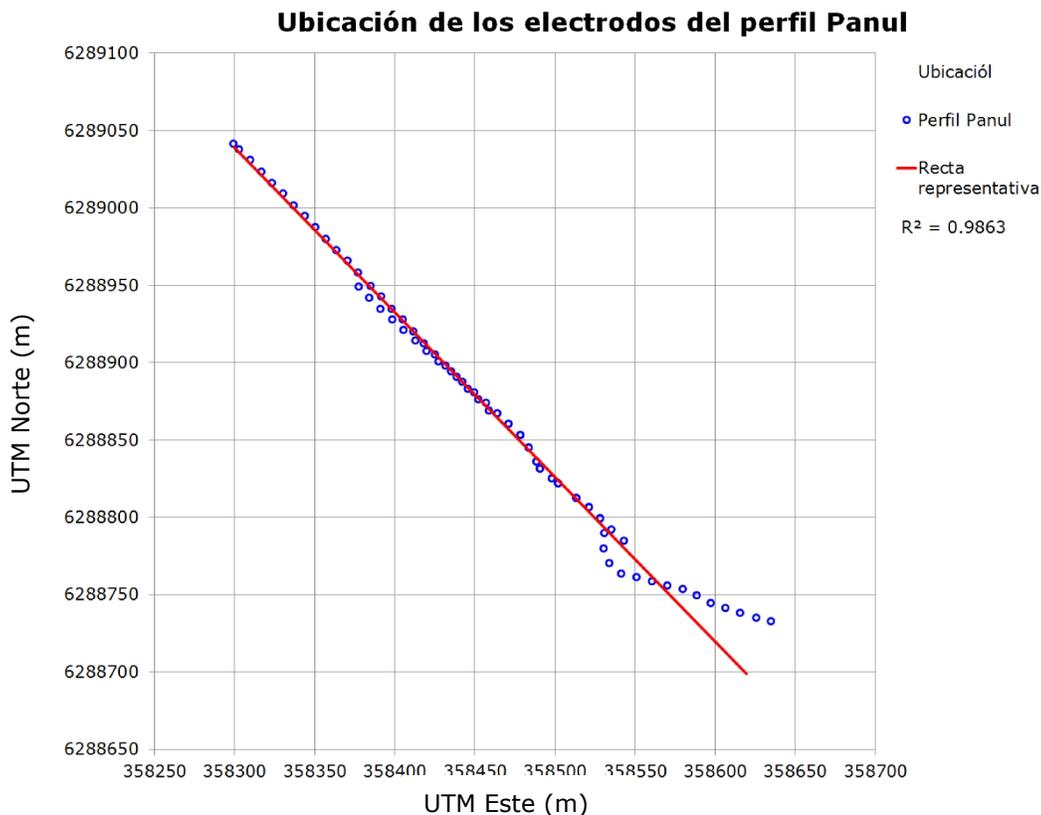


Figura 6.4: Círculos azules representan los electrodos del perfil Panul y en rojo la recta representativa de ellos. El coeficiente de determinación R^2 supera el 98%. Coordenadas en sistema UTM 19S, WGS84.

Tabla 6.6: Coordenadas referenciales del perfil Panul 2-D (UTM 19S, WGS84)

| Inicio | | Fin | |
|--------|---------|--------|---------|
| Este | Norte | Este | Norte |
| 358299 | 6289040 | 358610 | 6288709 |

6.2.2 Resistividad 3-D

Para el perfil Panul, y dada la cercanía a la linealidad en la disposición de los dos primeros tendidos, solamente los datos del tercer tendido fueron corregidos para pasar de una adquisición 3-D a un valor 2-D equivalente, como se define en la ecuación 5.3. La corrección de resistividades para el tercer tendido arrojó diferencias máximas de 48% (figura 6.5), con un promedio de 8,8%.

A diferencia del perfil Panul, el perfil Escrivá requirió la corrección de los valores de resistividad de todos sus tendidos. La corrección de estos valores de resistividad aparente arrojó diferencias máximas de 34,7% (figura 6.6) y un promedio de 0,9%.

Para la construcción de las pseudosecciones se consideró una pseudoprofundidad de 0.3 veces la separación entre los electrodos de inyección de corriente, y para la ubicación a lo largo del perfil se consideró el promedio de las coordenadas de los electrodos de corriente y potencial. Este valor corresponde a un promedio aproximado del factor de profundidad de investigación de los distintos arreglos geométricos utilizados en la adquisición de los datos trabajados en esta tesis (Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo). Los valores correspondientes para cada arreglo pueden ser encontrados en el trabajo de Edwards (1977).

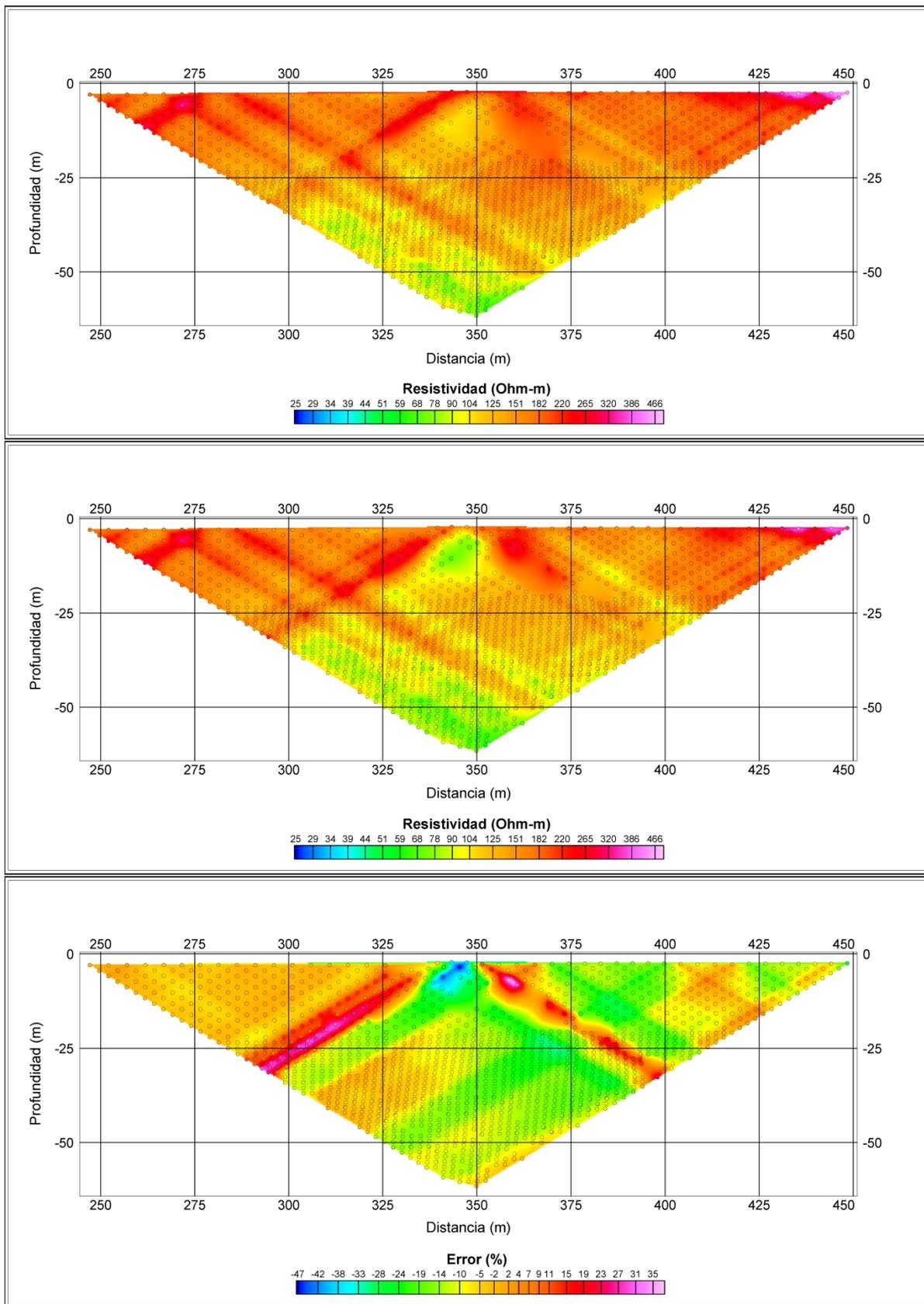


Figura 6.5: Para el perfil Panul; arriba, resistividad aparente calculada utilizando la ubicación nominal de electrodos; en medio, utilizando las ubicaciones corregidas; abajo, la diferencia porcentual entre ellas.

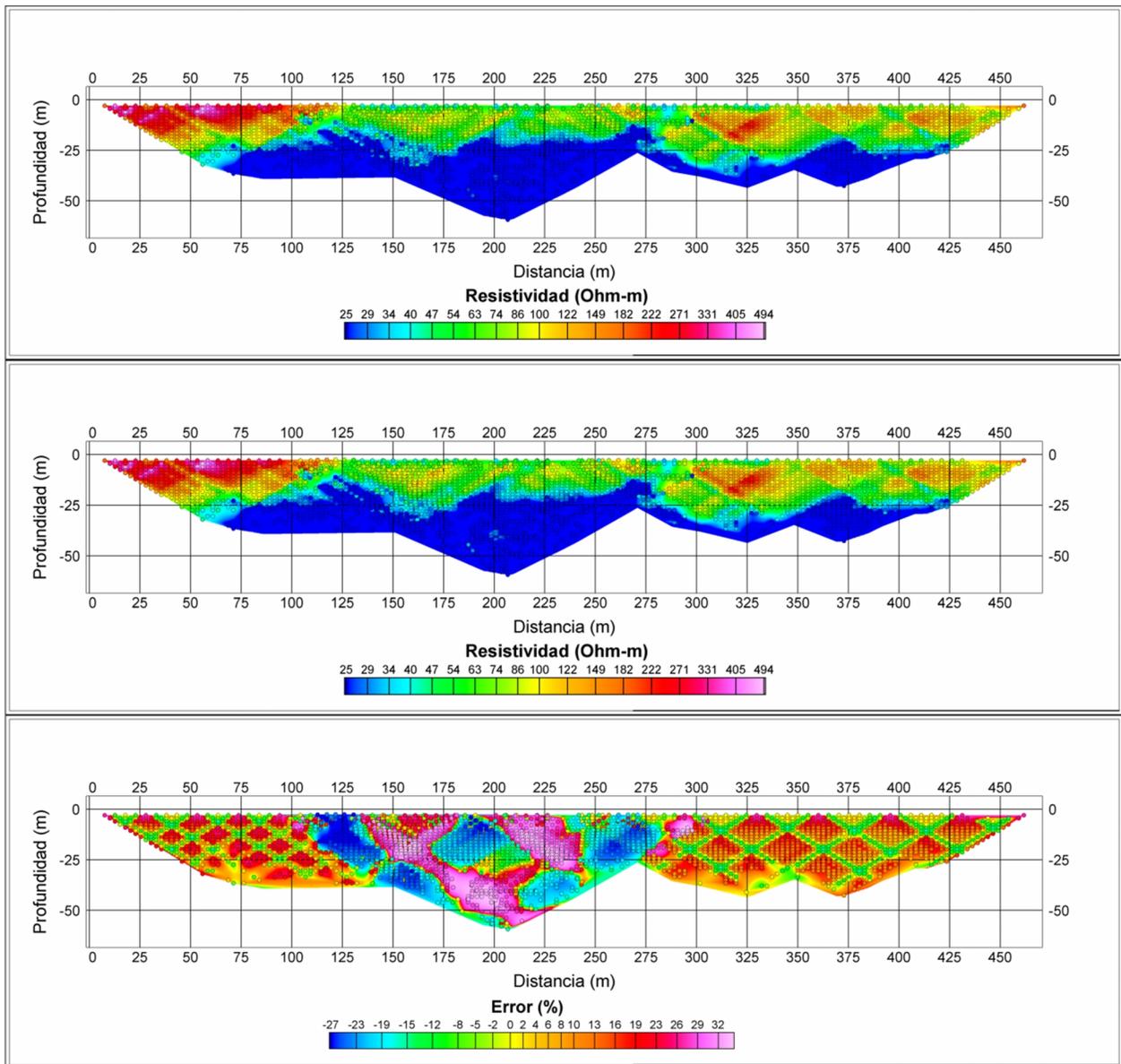


Figura 6.6: Para el perfil Escrivá; arriba, resistividad aparente calculada utilizando la ubicación nominal de electrodos; en medio, utilizando las ubicaciones corregidas; abajo, la diferencia porcentual entre ellas.

6.3 Modelo de inversión

Con los nuevos datos adquiridos como parte de esta tesis (Las pseudosecciones de todos los datos pueden ser encontradas en el Anexo II) se obtuvo modelos de resistividad para los perfiles Escrivá y Panul (Figuras 6.7 y 6.8). Se usó el mismo software de inversión empleado en el modelamiento de los datos reprocesados de los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul (capítulo 5).

Como parte del proceso de inversión se debió asignar un nivel de error a los datos. En el caso del perfil Escrivá, se asignó un error de 6 % para el primer tendido y 8% para el segundo tendido. Sobre el tercer tendido se midieron dos sets de datos, utilizando arreglos Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger; los errores asignados a estos datos fueron de 8% y 3.5%, respectivamente. Los principales motivos para la asignación de este error son el no contar con la ubicación precisa de los electrodos y las altas impedancias de contacto entre los electrodos y el suelo.

Para el caso del perfil Panul se utilizó un nivel de error de 5% en el primer y segundo tendido, mientras que en el tercer tendido el nivel de error utilizado fue de un 6%. Esta diferencia se debe a que el tercer tendido presentaba la mayor desviación respecto de la recta representativa del perfil.

La grilla utilizada en la inversión del perfil Escrivá consta de 86528 celdas de aproximadamente 1.25m de largo por 0.6m de altura (Figura 6.7). Para el perfil Panul el número total de celdas fue 106560 donde 92294 de ellas corresponden a celdas activas en las cuales se lleva a cabo inversión con un tamaño aproximado de 1.5m de largo por 0.6m de alto (Figura 6.8).

Asociado a los modelos de resistividad (Figuras 6.7 y 6.8), se generó el modelo de sensibilidad de cada perfil (disponibles en el Anexo II). Estos modelos de sensibilidad fueron utilizados para definir la profundidad hasta la cual se consideran representativos los modelos de resistividad. De manera análoga a los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul, este límite se fijó en el 50% más sensible del total de celdas que componen cada modelo.

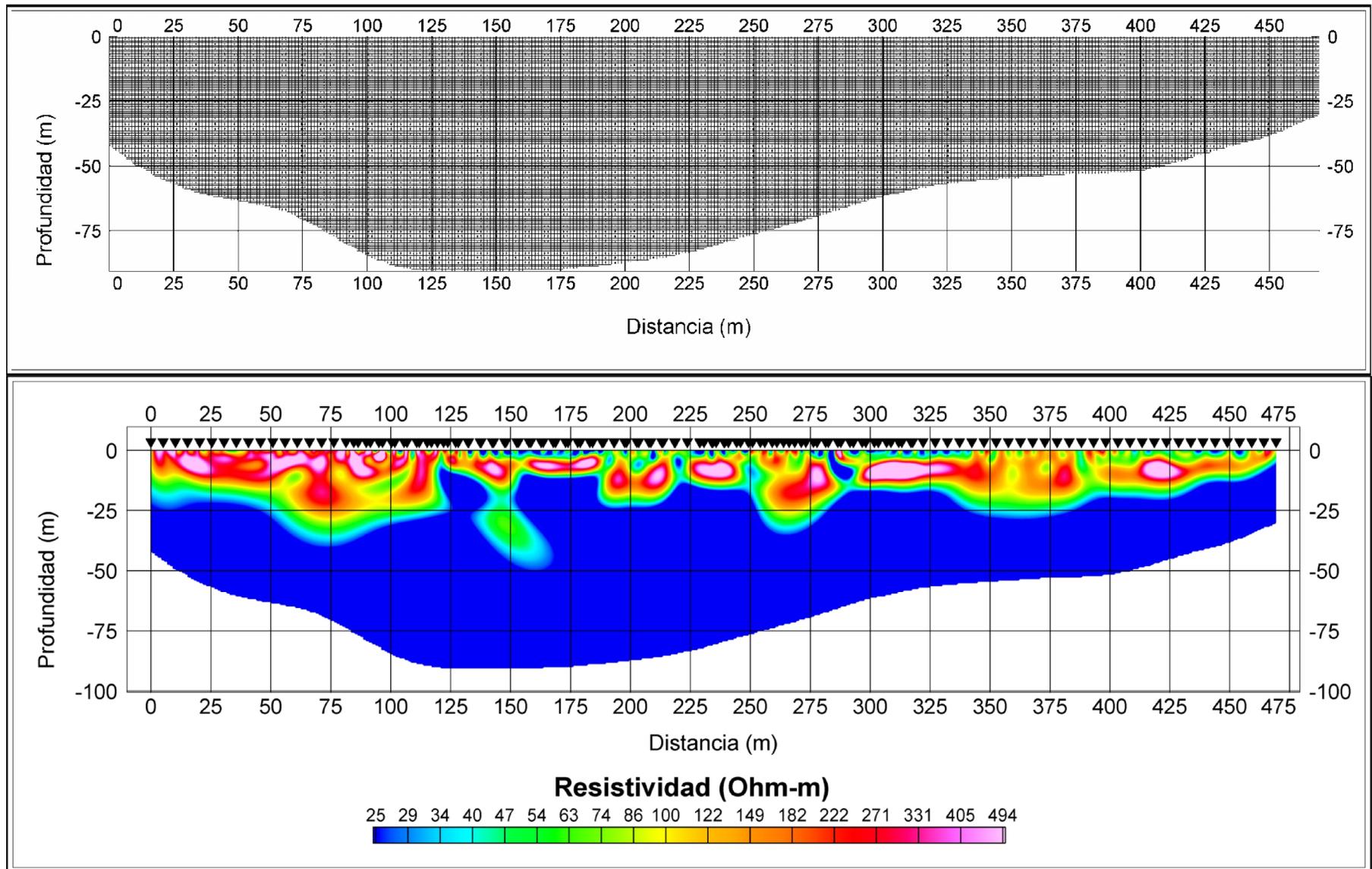


Figura 6.7: Grilla y modelo de resistividad, perfil Escrivá. Los triángulos negros invertidos marcan la posición de los electrodos a lo largo del perfil.

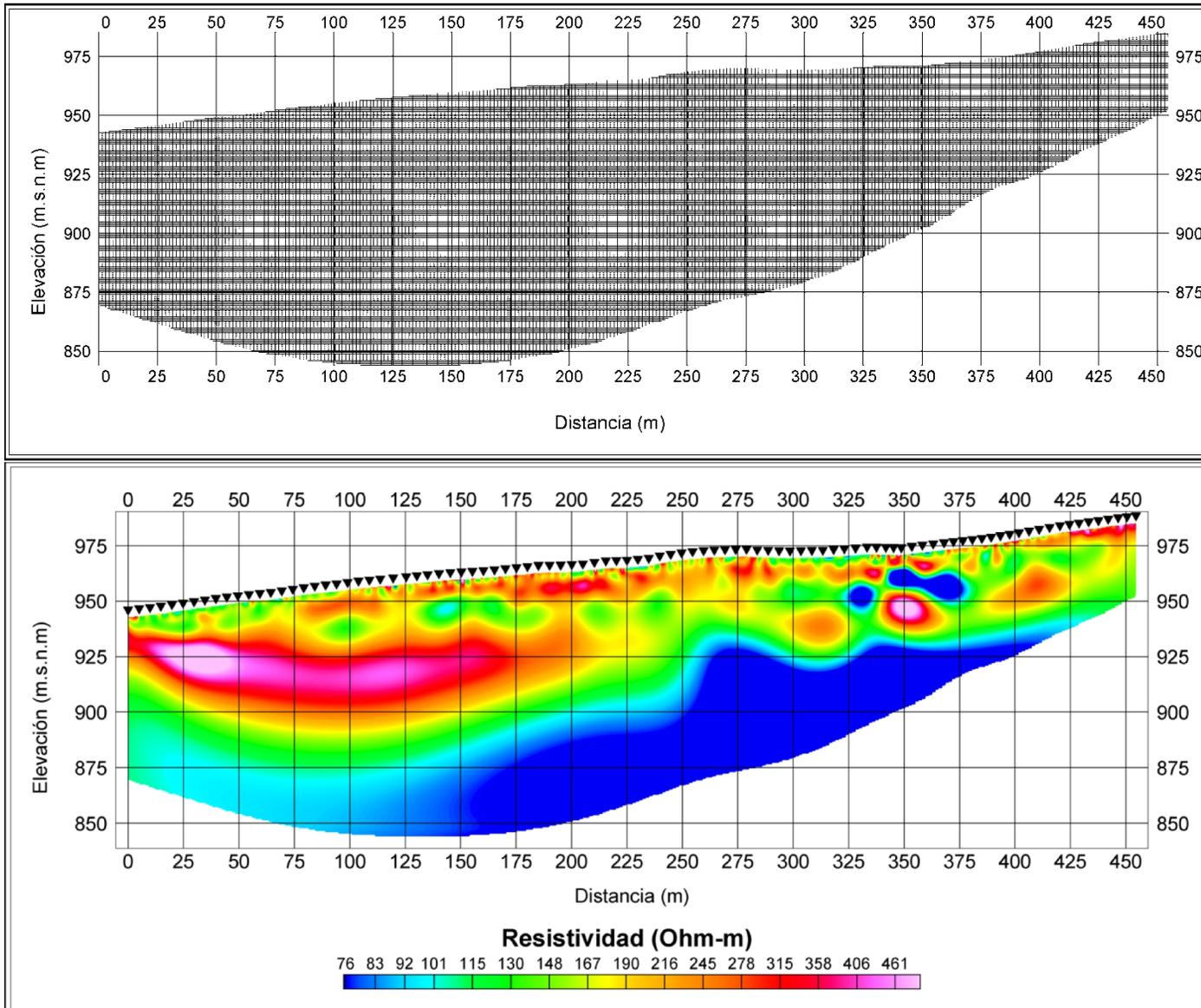


Figura 6.8: Grilla y modelo de resistividad, perfil Panul. Los triángulos negros invertidos marcan la posición de los electrodos a lo largo del perfil.

Capítulo 7

Análisis y discusión de resultados

7.1 Introducción

Los modelos de resistividad obtenidos para los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul se encuentran ubicados sobre la traza conocida y estudiada de la Falla San Ramón. La interpretación de la estructura de resistividad observada en ellos puede entonces ser correlacionada con la estratigrafía, en particular la estratigrafía sedimentaria, de dichas zonas y la forma en la cual se ha visto afectada por la presencia de la falla y los eventos sísmicos que pudieran haberla perturbado.

A partir de las correlaciones que se puedan establecer entre la estructura de resistividad y la estructura geológica de las zonas de los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul, se puede reconocer los rasgos característicos producidos por la Falla San Ramón en la estructura de resistividad somera. El reconocimiento de estos rasgos en los modelos de resistividad obtenidos para los nuevos perfiles adquiridos como parte de este trabajo de tesis (Escrivá y Panul) permitiría constituir el uso de la ERT como una metodología efectiva para la identificación y mapeo de la traza de la Falla San Ramón en zonas cubiertas.

7.2 Estratigrafía de los depósitos de piedemonte del frente cordillerano en las zonas de estudio

Parte importante del análisis de los modelos de resistividad, es el vínculo entre las estructuras de resistividad que se observa en ellos con la estratigrafía de las zonas en las cuales se ubican los perfiles modelados. Como es detallado en el capítulo 3 de esta tesis, los depósitos sedimentarios

presentes en el piedemonte santiaguino pueden clasificarse en tres tipos en base a sus edades relativas (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011; Figura 7.1).

En general, estos tres tipos de depósitos son similares entre sí: gravas con bloques de tamaño variable, en matriz de material fino (limos y arcillas), con intercalaciones de materiales más finos. Sin embargo, a pesar de las similitudes, se observan dos tendencias que permiten diferenciarlos: granulometría de los bloques y granulometría de las intercalaciones.

Los depósitos del Pleistoceno Inferior y Medio exhiben bloques de tamaños entre 10cm y 80cm con intercalaciones de arenas, gravilla y limos. Los depósitos del Pleistoceno Medio y Superior contienen bloques de tamaños que van de algunos pocos centímetros hasta 2m de diámetro con intercalaciones de arenas y materiales más finos en menor cantidad. Los depósitos del Pleistoceno Superior y Holoceno presentan bloques que van desde los 10cm a los 3m con intercalaciones de arena y en menor cantidad materiales finos (Rauld, 2011).

Se reconoce, entonces, una tendencia a la disminución del tamaño del material que conforma los distintos depósitos a medida que aumenta su edad, una tendencia similar en la granulometría de las intercalaciones y una tendencia a la disminución del contenido de limos y arcillas en la conformación de la matriz en la que están insertos. Esto concuerda con tendencias observadas a gran escala en la cuenca de Santiago en estudios de sondajes, donde el contenido de material fino aumenta con la edad de los depósitos (Emparán, 1966; Falcón et al., 1970; Iriarte, 2003). Si bien no se dispone de un análisis cuantitativo del contenido de limos y arcillas, se establece la tendencia cualitativa.

En base a lo expuesto en el capítulo 2 de esta tesis, es esperable que el aumento de contenido de limos y arcillas con la edad de los depósitos aluviales identificados, impacte disminuyendo la resistividad aparente esperada en ellos, al menos en presencia de fluidos (Waxman y Smits, 1968; Lesmes y Friedman, 2005).

7.2.1 Perfil San Ramón

En la zona donde fue adquirido el perfil San Ramón, se reconocen depósitos aluviales del Pleistoceno Inferior y Medio al Este de la traza falla inferida (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011), pertenecientes al afloramiento que

conforman los cerros Calán, Apoquindo y Los Rulos (C.C., C.A. y L.R. en la figura 7.1), mientras que al Oeste de la traza inferida se observa en superficie los depósitos del Pleistoceno Superior y Holoceno correspondientes al abanico aluvial moderno de la Quebrada San Ramón, con un espesor estimado de 20m (Armijo et al., 2010).

Este perfil se encuentra al pie del cerro Los Rulos, el cual forma una gran estructura junto a los cerros Apoquindo y Calán. En los niveles inferiores de esta estructura se observan afloramientos correspondientes a la Formación Abanico (Rauld, 2011), que constituiría el basamento de la cuenca en el sector oriente de ésta.

Al Oeste de la traza inferida, se observa al norte y sur del perfil exposiciones de los depósitos aluviales del Pleistoceno Medio y Superior. Esto abre la posibilidad de que estos mismos depósitos se encuentren por debajo del abanico aluvial en el lado Oeste del perfil.

7.2.2 Perfil Quebrada de Macul

En el sector norte de la Quebrada de Macul, donde está ubicado este perfil, la cobertura superficial corresponde mayoritariamente al abanico aluvial moderno de edad Holocena, cuyo espesor se estima en torno a los 100m (Armijo et al., 2010). En la parte oriental del perfil se reconoce un afloramiento de depósitos aluviales del Pleistoceno Inferior y Medio. Al sur de la Quebrada de Macul se identifican depósitos asignados a esta unidad que han sido interpretados como deslizamientos (Rauld, 2011); el afloramiento en el sector norte de la Quebrada de Macul podría ser una parte de este deslizamiento, disectado por la erosión de la quebrada.

7.2.3 Perfil Escrivá

El Parque Monseñor Escrivá de Balaguer se encuentra en la ribera sur del río Mapocho. Esta zona se encuentra cubierta por los depósitos del abanico aluvial del río Mapocho, correspondientes al Pleistoceno Superior y Holoceno. Este perfil se diferencia de los otros por estar más abajo del piedemonte en una zona con menor pendiente y por no contarse con afloramientos cercanos de depósitos aluviales de edades mayores el Pleistoceno Superior.

7.2.4 Perfil Panul

En el Bosque El Panul se reconocen en superficie depósitos aluviales del Pleistoceno Superior y Holoceno, y particularmente en algunos sectores depósitos correspondientes al aluvión de Mayo de 1993 (Sepúlveda et al., 2006). Se desconoce entonces la edad de los depósitos inmediatamente bajo la cobertura aluvial holocena. En el sector de Lo Cañas, cercano al perfil Panul, se han identificado depósitos del Pleistoceno Inferior y Medio, los cuales han sido interpretados como deslizamientos (Rauld, 2011).

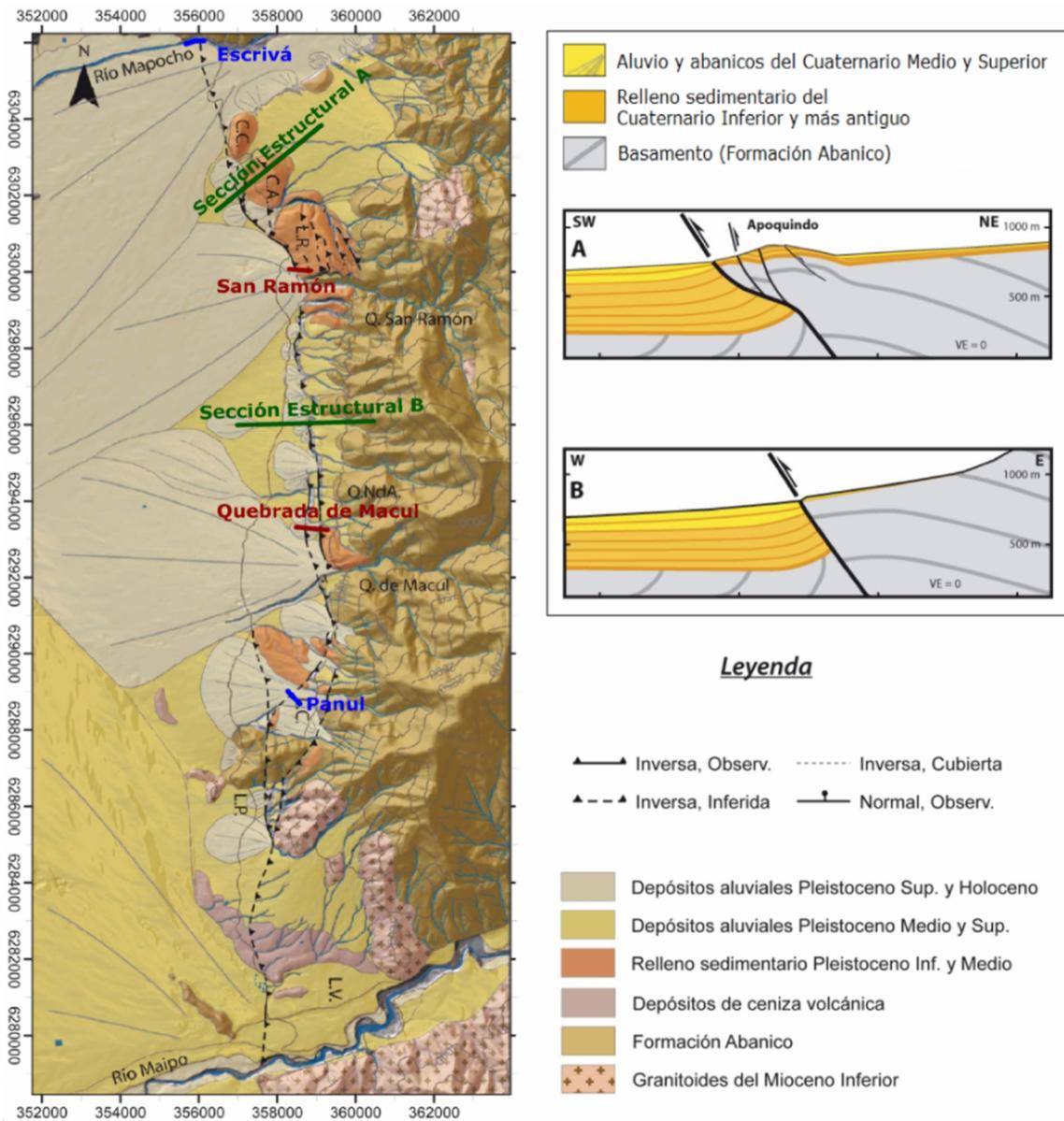


Figura 7.1: Morfoestratigrafía del frente cordillerano, perfiles ERT (Escrivá, San Ramón, Quebrada de Macul, Panul) y secciones estructurales interpretativas. Modificado de Armijo et al. (2010); Rauld (2011).

7.3 Niveles estáticos de aguas subterráneas

La provincia de Santiago territorialmente abarca la parte central de la cuenca de Santiago y en ella se registran más de 2.000 solicitudes de derechos de agua. En esta provincia se sitúan todas las zonas de estudio de este trabajo.

Para efectos de interpretar la posible presencia de niveles freáticos en la estructura de resistividad observada en los modelos obtenidos, es importante contar con información sobre el nivel freático en las zonas de estudio. Muñoz et al. (2014) presentan una estimación del nivel estático en la cuenca de Santiago (Figura 7.2).

La base de datos utilizada por Muñoz et al. (2014) cubre extensivamente la cuenca, pero tiene pocos datos en el piedemonte y los alrededores de la Falla San Ramón. A pesar de esta limitada cobertura en el piedemonte, existen sin embargo algunos pozos entre las quebradas San Ramón y Macul, además de una gran cantidad de pozos en la ribera sur del río Mapocho, muy cerca de la zona donde fue adquirido el perfil Escrivá.

7.3.1 Perfil San Ramón

De acuerdo a los registros de la Dirección General de Aguas (DGA), los pozos más cercanos a este perfil se encuentran a 1.800m de distancia hacia el sur, en el lado Este de la traza de la Falla San Ramón (Figura 7.3), que en este sector se reporta como observada (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011). Los niveles estáticos en el perfil se ubicarían entre los 80m y 90m de profundidad, cercanos al límite inferior del modelo (Figura 7.4).

7.3.2 Perfil Quebrada de Macul

Los derechos de agua cercanos al perfil Quebrada de Macul se encuentran a unos 3.300m hacia el norte, en el lado este de la traza de la Falla San Ramón, reportada como observada en este sector (Figura 7.3). Los niveles estáticos calculados por Muñoz et al. (2014) indican que en este sector el nivel del agua subterránea se ubicaría entre los 125m y 150m de profundidad, por debajo de la profundidad abarcada por el modelo de resistividad (Figura 7.5).

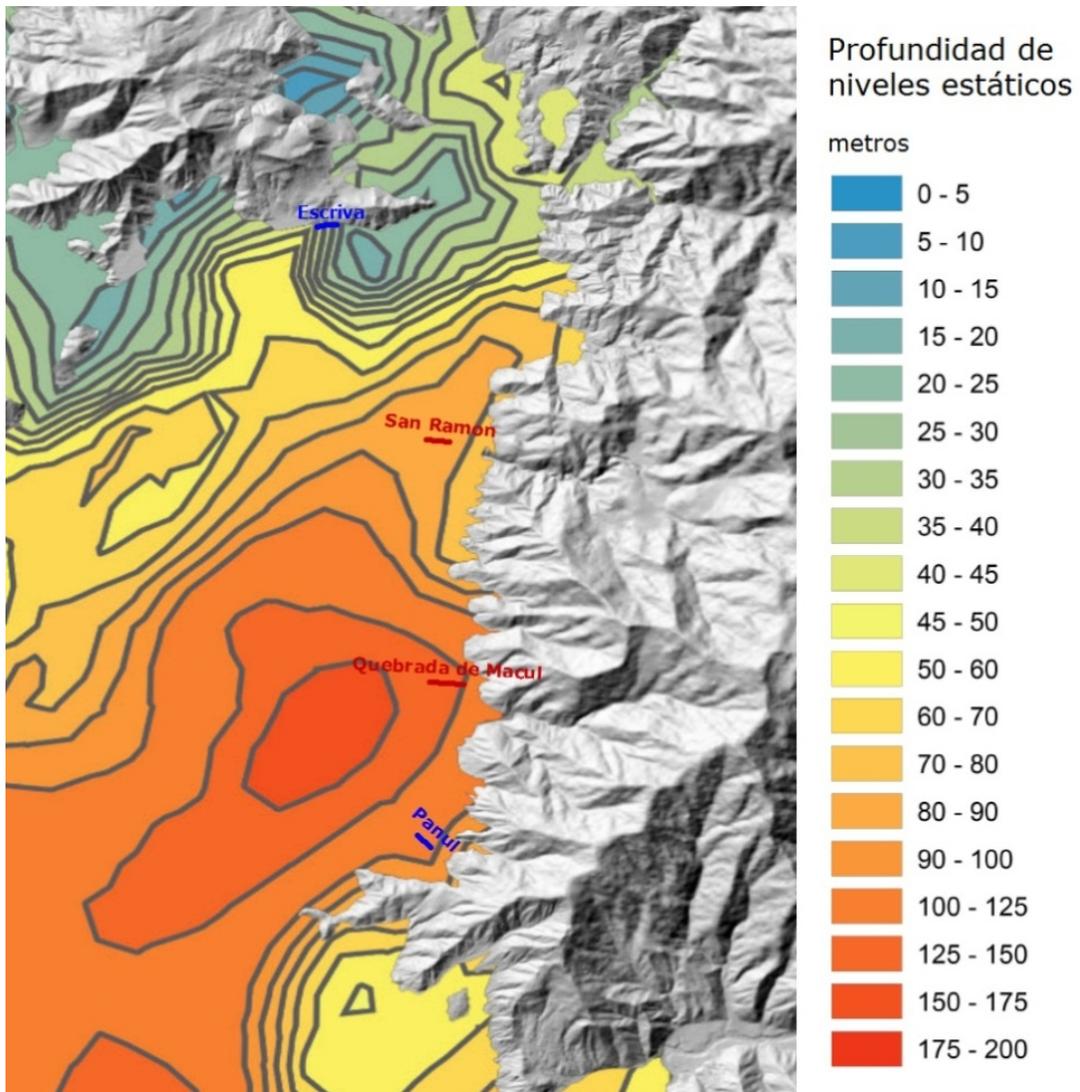


Figura 7.2: Niveles estáticos del agua subterránea en la cuenca de Santiago y perfiles ERT considerados en este estudio (Escrivá, San Ramón, Quebrada de Macul, Panul). Modificado de Muñoz et al. (2014).

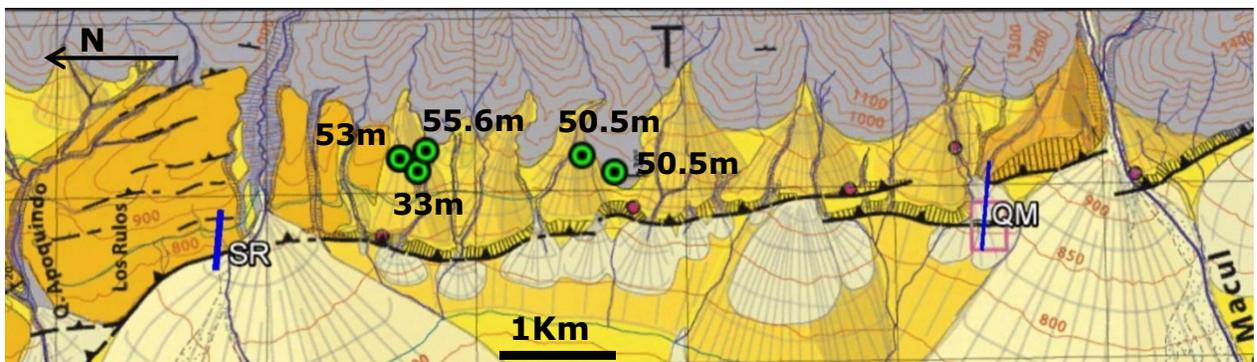


Figura 7.3: En líneas azules, la ubicación de los perfiles San Ramón (SR) y Quebrada de Macul (QM). En marcadores circulares verdes, pozos registrados en la DGA y su nivel estático. El recuadro rojo indica el área del levantamiento DGPS de la figura 3.3. Modificado de Armijo et al. (2010).

7.3.3 Perfil Escrivá

Este perfil se encuentra en la ribera sur del río Mapocho, en donde se encuentra registrada una gran cantidad de pozos (Muñoz et al., 2014). El comportamiento observado para el nivel estático en este sector muestra un importante cambio de profundidad en dirección este-oeste (Figura 7.2). En particular para el perfil Escrivá, medido en el Parque Monseñor Escrivá de Balaguer a unas pocas decenas de metros del lecho del río Mapocho, se observa un nivel que varía de 25m-30m en el extremo Este a 40m-45m en el extremo Oeste del perfil. En esta zona, a pesar de la presencia del cauce del río, esto no tendría control prioritario sobre el nivel estático del agua subterránea (Muñoz, M., Comunicación Personal). Este perfil es el único con un nivel estático que debiese ser bien cubierto por el modelo de resistividad.

7.3.4 Perfil Panul

Este perfil es el que cuenta con menor información para la determinación de los niveles estáticos. Los puntos de control en el piedemonte se ubican a más de 7km de distancia, mientras que los puntos de control en la cuenca se ubican a más de 4km. Pese a esto se reportan niveles estáticos entre 100m y 125m, lo cual indicaría que el nivel freático se encuentra por debajo de las profundidades modeladas.

7.3.5 Resumen

En general se reportan niveles estáticos por debajo de las profundidades abarcadas por los modelos ubicados en el piedemonte (San Ramón, Quebrada de Macul y Panul), mientras que en el caso del perfil Escrivá, ubicado junto al río Mapocho, el nivel estático se ubica en el rango de profundidades modeladas confiablemente.

El modelo de niveles estáticos presentado por Muñoz et al. (2014), se encuentra poco constreñido en el piedemonte, dada la baja densidad de pozos en la zona precordillerana y la distancia de los pozos a los perfiles que fueron modelados en este trabajo. Por este motivo, estos niveles son considerados sólo como referencia.

7.4 Estructura de resistividad sobre la traza observada de la Falla San Ramón

Los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul cumplen la condición de cruzar la traza observada de la Falla San Ramón; por lo tanto, el análisis de la estructura de resistividad modelada en estos perfiles permitiría reconocer y caracterizar las variaciones de resistividad atribuibles a la presencia de la falla cerca de la superficie.

7.4.1 Perfil San Ramón

En base al reconocimiento de escarpes y el mapeo de depósitos mayoritariamente aluviales en este sector Armijo et al. (2010) y Rauld (2011) proponen una localización de traza observada para la Falla San Ramón. Esta ubicación coincide con un contacto en superficie entre depósitos aluviales del Pleistoceno Inferior y Medio en el Este, y depósitos aluviales del Pleistoceno Superior y Holoceno en el Oeste, identificados como el abanico aluvial moderno de la Quebrada San Ramón. El cruce entre esta traza propuesta y el modelo de resistividad ocurre aproximadamente a los 210m del perfil (figura 7.4, flecha marcada con letra C). Además, los autores antes mencionados infieren la traza de una ramificación de la falla que intersecta al perfil a los 470m (figura 7.4., flecha marcada con letra D).

El modelo de resistividad de este perfil (Figura 7.4) muestra dos unidades, una de baja resistividad en el lado Este y otra de alta resistividad en el lado Oeste. En torno a la coordenada 280m, se reconoce un escarpe que ha sido asociado a la traza de la Falla San Ramón (Vargas, G., Comunicación Personal). Este escarpe coincide con el contacto entre las unidades de alta y baja resistividad, interpretado como el plano de la Falla San Ramón (Figura 7.4, línea segmentada roja marcada con letra A), no sólo en este trabajo, sino previamente por Díaz et al. (2014).

En base al mapeo de depósitos sedimentarios sobre el perfil, es posible asociar la unidad de baja resistividad con los depósitos sedimentarios del Pleistoceno Inferior y Medio, y la unidad de alta resistividad con el abanico aluvial Holoceno (Figura 7.1). La diferencia de resistividad entre estos depósitos se daría por el mayor contenido de arcillas identificado en la matriz de los depósitos del Pleistoceno Inferior y Medio (Rauld, 2011).

En este perfil el nivel estático se ubicaría entre los 80m y 90m de profundidad (Muñoz et al., 2014). La unidad de alta resistividad observada varía levemente su espesor de Este a Oeste, pasando de 60m bajo la traza de falla aquí interpretada, a 80m bajo la traza propuesta anteriormente (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011). La profundidad de nivel estático calculada para la zona coincide con la profundidad a la cual se observa una disminución de la resistividad en la mitad Oeste del perfil, lo que sugiere un aumento del contenido de fluidos por debajo de dicha profundidad.

La posición de la traza de falla interpretada en base al modelo de resistividad (Figura 7.4, letra A) dista aproximadamente 70m de la posición propuesta en base a observaciones geológicas por otros autores (letra C en figura 7.4, Armijo et al., 2010; Rauld, 2011), pero coincide muy bien con la posición propuesta en base a modelos de resistividad por Díaz et al. (2014). El mapeo del plano de falla interpretado ronda los 30°E, lo cual dista considerablemente de los 55°E-60°E globalmente observados (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011); esta diferencia concuerda con las observaciones locales de Rauld (2011) en la vecindad de los cerros Calán, Apoquindo y Los Rulos, donde se han reconocido cambios en la geometría de la falla. Entre ambas ubicaciones, en superficie se observa una cobertura de baja resistividad y con espesor menor a 20m, mapeada como depósitos del Pleistoceno Inferior y Medio (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011). Esta cobertura sería entonces parte de un deslizamiento de material (figura 7.4, zona delineada con línea negra continua, letra B).

7.4.2 Perfil Quebrada de Macul

En la zona donde fue adquirido este perfil se han observado dos escarpes jóvenes y bien preservados (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011)) que intersectan el perfil en las coordenadas 210m y 640m del modelo de resistividad (Figura 7.5, flechas letras C y D). A partir de estos escarpes se han propuesto dos trazas de falla coincidentes con ellos (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011). En la traza Oeste (Figura 7.5, letra C) se excavaron trincheras en las que se pudo observar el plano de falla (Vargas et al., 2014).

El mapeo de depósitos en superficie (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011) indica que los primeros 590m del perfil se encuentran cubiertos por depósitos aluviales del Pleistoceno Superior y Holoceno, asociados a los abanicos modernos de la Quebrada de Macul y algunas quebradas menores de la zona (Figura 7.1). A partir de los 590m y hasta el final del perfil en superficie se reconocen depósitos aluviales del Pleistoceno Inferior y Medio (Figura 7.1).

Dentro del perfil se reconocen dos unidades, una de alta y otra de media resistividad, cuyo contacto es principalmente horizontal. La unidad de alta resistividad exhibe valores sobre los 200 Ohm-m, mientras que la unidad de baja resistividad tiene valores bajo los 100 Ohm-m, generándose una zona de transición, principalmente en los primeros 200m del perfil, aprox.

La unidad de alta resistividad coincide con la cobertura identificada como el abanico aluvial moderno en los primeros 590m del perfil. En este límite (590m) se reconoce un abanico aluvial pequeño (Rauld, 2011), la erosión producto del emplazamiento de este abanico facilitaría la infiltración de flujos superficiales, lo que disminuye localmente la resistividad en este borde. El espesor de esta unidad muestra, en general, un aumento gradual de Este a Oeste. Se observan algunas disminuciones abruptas del espesor a lo largo del perfil, dos de ellas coincidentes con las trazas de falla propuestas previamente (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011; figura 7.5). En base a estos antecedentes se interpreta que las trazas propuestas corresponderían efectivamente a la ruptura en superficie de los planos de falla (Figura 7.5, líneas segmentadas rojas, letras A y B), concordantes con los interpretados por Díaz et al. (2014). El ángulo de manto de ambos planos es de 55°E

Los depósitos del Pleistoceno Inferior y Medio al Este de los 590m del perfil presentan un espesor irregular y, en general, menor a 10m. Esto indica que se trataría de deslizamiento, similar a los reconocidos en el sector de Lo Cañas, unos pocos kilómetros al sur del perfil (Rauld, 2011).

La zona de transición (resistividad entre 100 y 200 Ohm-m) muestra un fuerte aumento de espesor al oeste de la traza de falla observada a los 210m del perfil. Entre los 0m y 210m del perfil la cobertura de alta resistividad alcanza profundidades de casi 60m. Por debajo de esta profundidad no se observa variación en la resistividad. En este perfil el nivel estático se encuentra entre 125m y 150m, por lo que se descarta su influencia en este cambio de resistividad. Cabe entonces la posibilidad de que entre los 0m y 210m del perfil y a profundidad superior a los 60m se encuentre otro tipo de depósitos. Al Oeste de la traza de falla ocurren afloramientos de depósitos aluviales del Pleistoceno Medio y Superior al Norte y Sur del perfil. Entonces, es posible asumir que la unidad de resistividad en el rango de 100 a 200 Ohm-m observada bajo los 60m de profundidad en los primeros 210m del perfil corresponde a estos depósitos. Más aún, no se reconocen en el sector depósitos del Pleistoceno Inferior y Medio, salvo por deslizamientos de material, por lo que es posible inferir que bajo la cobertura aluvial moderna en todo el perfil los depósitos corresponderían a edades del Pleistoceno Medio y Superior con un mayor contenido de fluidos. Esto indicaría que el plano de falla presenta una baja permeabilidad.

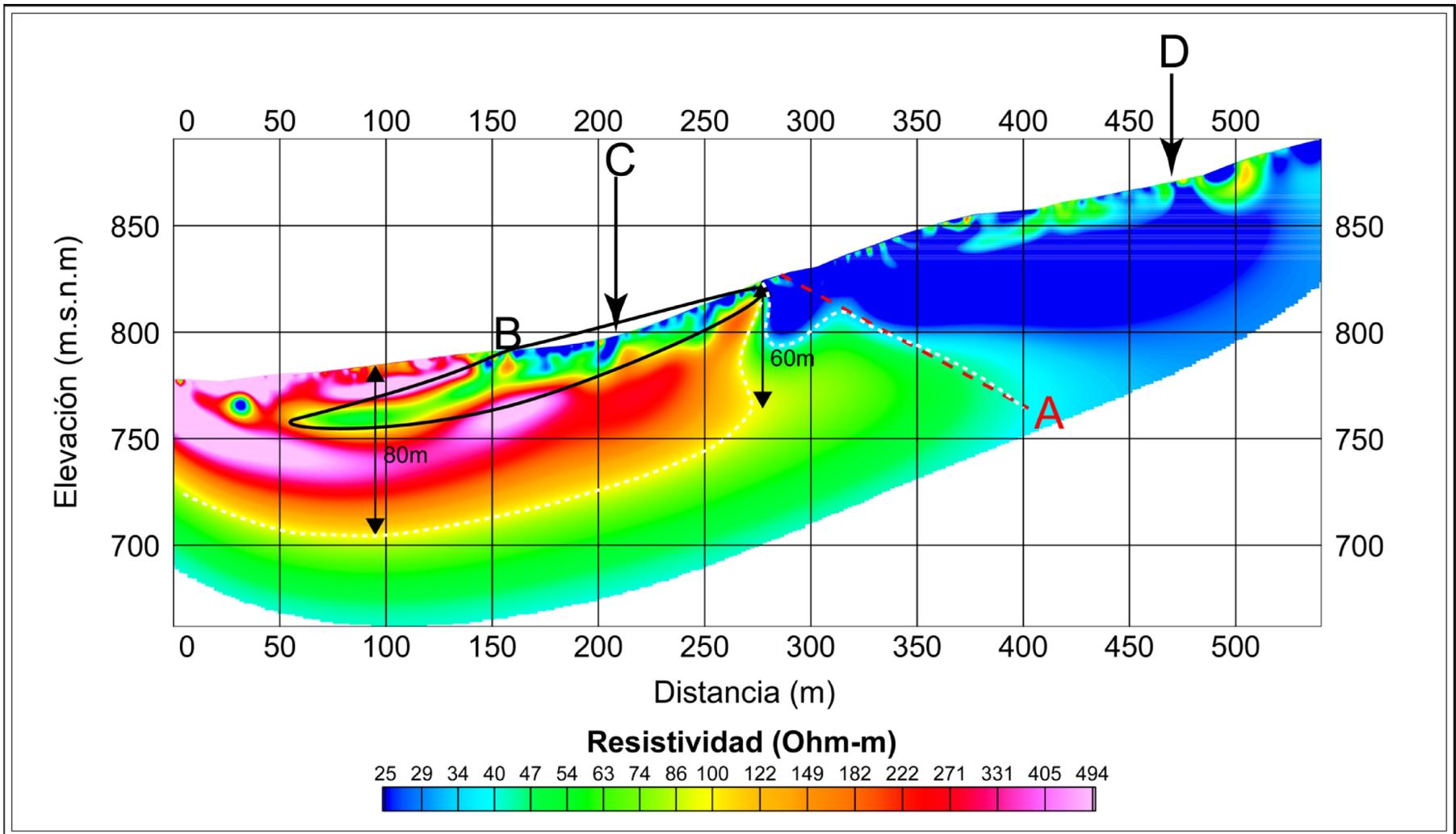


Figura 7.4: Modelo de resistividad del perfil San Ramón. La línea blanca segmentada delimita aproximadamente las unidades de resistividad baja, intermedia y alta reconocibles en el modelo. La intersección entre el perfil y las trazas observada (C) e inferida (D) por Armijo et al. (2010) y Rauld (2011) se indica con flechas sobre la superficie. La línea roja (A) indica el plano de falla interpretado en este trabajo, con un ángulo de 30° respecto de la horizontal. La zona encerrada en línea negra continua (B) correspondería a un deslizamiento de material.

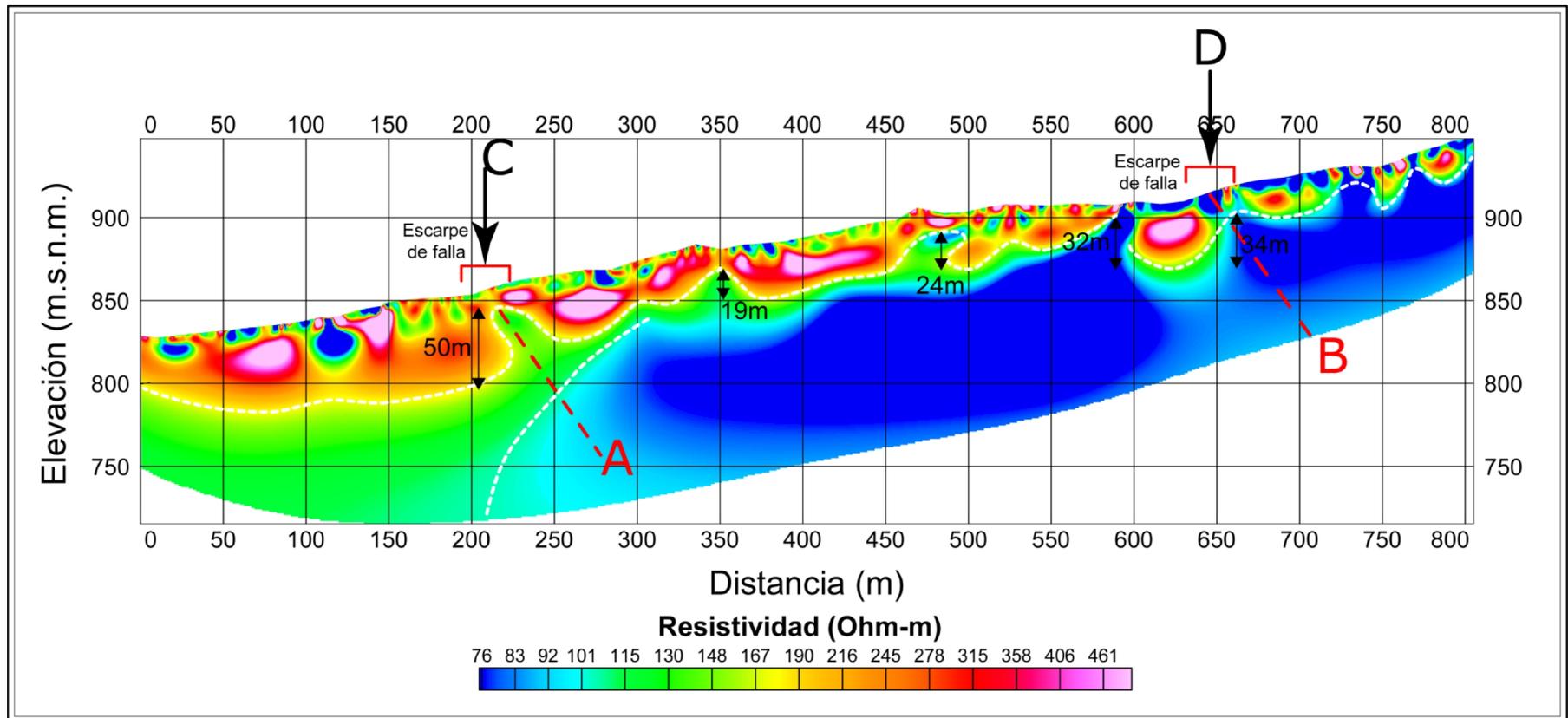


Figura 7.5: Modelo de resistividad del perfil Quebrada de Macul. La línea blanca segmentada delimita aproximadamente las unidades de resistividad baja, intermedia y alta reconocibles en el modelo. Las flechas verticales (C, D) indican la intersección en superficie entre el perfil y las trazas observadas de la Falla San Ramón, coincidentes con escarpes reconocidos en la zona por Armijo et al. (2010) y Rauld (2011), segmentos delimitados con líneas rojas en superficie. La línea roja indica los planos de falla interpretados en este trabajo (A, B), con ángulo de 55° respecto de la horizontal. En esta zona Rauld (2011) observa un manteo de 60° E para el plano de falla principal (Sección estructural B en la figura 7.1).

7.4.3 Estructura de resistividad característica

La interpretación de los modelos de resistividad de los perfiles San Ramón y Quebrada de Macul junto a la información geológica disponible, permite identificar características de las unidades geológicas presentes y rasgos asociados a la presencia de la Falla San Ramón.

En base a la interpretación de los perfiles, ha sido posible asociar rangos de resistividad a los distintos tipos de depósitos aluviales presentes en los perfiles. De esta forma, se observa que los depósitos aluviales del Pleistoceno Inferior y Medio presentan valores de resistividad menores a 75 Ohm-m (figura 7.4 y su interpretación en sección 7.4.2), llegando a valores incluso menores a 25 Ohm-m (figura 7.4 y su interpretación en sección 7.4.1). Los depósitos aluviales del Pleistoceno Medio y Superior, si bien no afloran en los perfiles interpretados, se infiere su presencia bajo el abanico aluvial moderno en el perfil Quebrada de Macul y alcanzarían valores de resistividad entre los 75 y 200 Ohm-m, según su contenido de fluidos (figura 7.5 y su interpretación en sección 7.4.2). Los depósitos aluviales del Pleistoceno Superior y Holoceno, por lo general asociados a los abanicos aluviales modernos y activos presentan valores de resistividad por sobre los 200 Ohm-m.

La diferencia de resistividad observada o estimada para los distintos tipos de depósitos concuerda con lo esperado en base a la diferencia observada en su granulometría, donde los depósitos más antiguos presentan un mayor contenido de material fino (Rauld, 2011). Si bien las diferencias observadas en cuanto al contenido relativo de material son leves, los valores de resistividad obtenidos en los modelos indican que serían suficiente para generar una diferencia perceptible.

En general los modelos obtenidos se encuentran por encima del nivel estático (Muñoz et al., 2014), y por lo tanto los sedimentos correspondientes se encuentran en condición de subsaturación. Los fluidos presentes en ellos corresponderían a infiltración superficial.

La profundidad a la cual se ubicaría el nivel estático se alcanza sólo en el perfil San Ramón. En este perfil se reconoce una variación vertical de la resistividad asociada al nivel estático (figura 7.4, al Oeste del plano de falla interpretado, A). En el lado Este del perfil no se aprecia una disminución similar de resistividad. Esto indicaría que el bloque colgante está en una condición de saturación relativamente homogénea y la disminución relativa

de la permeabilidad en el plano de falla condicionaría una profundización del nivel estático o al menos un nivel de saturación suficiente para disminuir significativamente la resistividad de los depósitos. A esto contribuiría una posible diferencia en la composición de los depósitos a ambos lados de la falla.

Analizar el contraste de resistividad entre ambos lados del plano de falla (figuras 7.4 y 7.5, planos de falla marcados con la letra A) permite identificar una diferencia importante entre ellos. Si se asume una continuidad en el tipo de depósitos, entonces el contraste de resistividad debe corresponder a cambios en el contenido de fluidos. Esto indicaría que al Oeste de la falla hay menos fluidos, lo que permite interpretar que el plano de falla actuaría como una barrera a la migración de fluidos. Este es uno de los posibles comportamientos que podría mostrar un plano de falla, de acuerdo a lo expuesto por Caine et al. (1996), quien plantea la posibilidad de que un plano de falla pueda dificultar y/o facilitar la circulación de fluidos. Para corroborar esto se necesitaría información sobre el contenido de fluidos en los depósitos a ambos lados de la falla, puesto que la resolución de los niveles estáticos dados por Muñoz et al. (2014) no permite concluir respecto a esta posibilidad.

7.5 Estructura de resistividad en zonas cubiertas

La ubicación reconocida de la Falla San Ramón ocurre entre el Cerro Calán y la Quebrada de Macul; sin embargo, en este tramo de largo menor a 15km, gran parte se encuentra cubierta por abanicos aluviales y/o desarrollo urbano, dificultando la observación y estudio directo de su traza y posible expresión superficial.

7.5.1 Perfil Escrivá

Este perfil se ubica en la ribera sur del río Mapocho, en el extremo norte de la traza inferida (figura 7.6, línea negra segmentada marcada con la letra C) disponible en la literatura (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011). La zona se encuentra cubierta por depósitos del Pleistoceno Superior y Holoceno, pertenecientes al abanico aluvial del río Mapocho. Se desconoce la edad de los depósitos bajo este abanico.

En el modelo se reconocen 2 unidades, una profunda de baja resistividad (bajo 25 Ohm-m), y otra somera de alta resistividad (sobre 150 Ohm-m), con un espesor variable entre 10m y 25m, correspondiente al abanico aluvial del río Mapocho.

La cobertura presenta cambios abruptos de espesor que van desde los 13m hasta 22m (Figura 7.6). Uno de estos cambios abruptos ocurre a los 120m del perfil y se interpreta como la posible traza de la Falla San Ramón (Figura 7.6, línea roja segmentada marcada con la letra A). El plano de falla interpretado se ha dibujado con un manto de 40°E, según lo observado por Rauld (2011) en secciones estructurales cercanas (Figura 7.1, sección estructural A) y logra una buena alineación entre un cambio de 22m en el espesor de la cobertura y un lente de resistividad intermedia en profundidad. Otro cambio de espesor importante de 18m a los 260m sobre el perfil (Figura 7.6) se interpreta como una posible ramificación de la Falla San Ramón en el sector, en atención a la magnitud del cambio de espesor y que en dicha zona se observa una breve interrupción de la cobertura con bajos valores de resistividad (Figura 7.6, línea roja segmentada marcada con la letra B en torno a los 280m del perfil).

En general la cobertura presenta continuas variaciones de su espesor, cabiendo la posibilidad de que no tengan su origen en fallamiento, sino en procesos erosivos durante el emplazamiento del abanico aluvial moderno.

Se desconoce la naturaleza de los depósitos cubiertos por el abanico moderno, pero se sabe que en esta zona los niveles estáticos son relativamente someros. En pozos registrados en la Dirección General de Aguas ubicados a menos de 300m del perfil, en el Colegio de los Sagrados Corazones de Manquehue, se reportan niveles estáticos de aproximadamente 12m de profundidad. Estos pozos son utilizados por Muñoz et al. (2014) con un rango de error de 10m, que sitúa el nivel estático por sobre los 22m de profundidad. Esto indica que la unidad de baja resistividad corresponde a depósitos saturados y que el abanico aluvial moderno tendría una baja permeabilidad.

7.5.2 Perfil Panul

El Bosque El Panul se encuentra en un sector en el cual se identifican varios abanicos aluviales activos que se superponen entre sí (Rauld, 2011). Además del aporte constante de las quebradas de la zona, existen registros de repetidos eventos catastróficos, tales como el aluvión de Mayo de 1993

(Naranjo y Varela, 1996; Sepúlveda et al., 2006). No se han identificado depósitos de mayor antigüedad a lo largo del perfil.

El nivel estático en esta zona se ubicaría entre los 100m y 125m de profundidad (Muñoz et al., 2014). Este valor es considerado sólo como una estimación gruesa, puesto que el pozo más cercano se encuentra a más de 4km de distancia.

La traza inferida intersecta el perfil a los 120m (Figura 7.7, línea negra segmentada marcada con la letra C). La localización de esta traza inferida coincide con el contacto reportado entre dos abanicos aluviales reconocidos en el sector (Rauld, 2011). La naturaleza del contacto entre estos abanicos se desconoce, al igual que su relación temporal.

En el modelo se distingue una cobertura de alta resistividad con numerosas heterogeneidades y espesor variable entre 40m y 80m (Figura 7.7). Los deslizamientos de depósitos aluviales del Pleistoceno Inferior y Medio identificados en el sector de Lo Cañas serían concordantes con los lentes de menor resistividad observados entre los 325m y 375m del perfil (Figura 7.7, sector encerrado en línea negra continua marcada con letra B).

En la parte inferior del modelo se distingue una unidad de baja resistividad con valores menores a 100 Ohm-m, similares a los observados en profundidad en el perfil Quebrada de Macul (Figura 7.5, plano de falla identificado con la letra A). En base a la morfoestratigrafía observada en las cercanías del perfil, es posible asignar esta unidad a depósitos del Pleistoceno Medio y Superior, lo que se refuerza por la similitud de los valores de resistividad observados en ellos, muy similares a los vistos en el perfil Quebrada de Macul.

Entre los 240m y 260m del perfil se observa un abrupto cambio en el espesor de la cobertura de alta resistividad. De no existir dicho cambio, el contacto entre las unidades de alta y baja resistividad sería gradual y con pendiente muy similar a la observada en la topografía de la zona. Es por esto que se interpreta este cambio de espesor en la cobertura como evidencia de la presencia de la Falla San Ramón (Figura 7.7, plano de falla indicado con línea roja segmentada marcada con la letra A). Esta ubicación de la falla dista en alrededor de 140m de la ubicación inferida por estudios geológicos previos (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011).

Una explicación alternativa al cambio de espesor en la cobertura proviene de la interacción entre los abanicos aluviales reconocidos en la zona. El emplazamiento de un nuevo abanico de mayor energía podría erosionar parte del abanico antiguo, generando una diferencia de nivel en sus bordes. Se requeriría de tomografías que crucen el eje de dichos abanicos para ahondar en esta posibilidad.

Si bien en la zona del perfil el nivel estático se reporta entre los 100m y 125m de profundidad, la distancia a los pozos que constriñen este valor es de 4km, lo que genera dudas sobre la validez de este rango. Si se asume como desconocido el nivel estático, entonces puede interpretarse la base de la unidad de alta resistividad como el nivel freático. De ser este el caso, el plano de falla marcaría un importante cambio de nivel freático, consistente con una disminución de la permeabilidad del plano de falla, como es sugerido para el perfil San Ramón (Díaz et al., 2014). En registros oficiales no existen pozos a menor distancia que los utilizados por Muñoz et al. (2014), y a la fecha no se cuenta con información de pozos no registrados que permitan corroborar esta hipótesis.

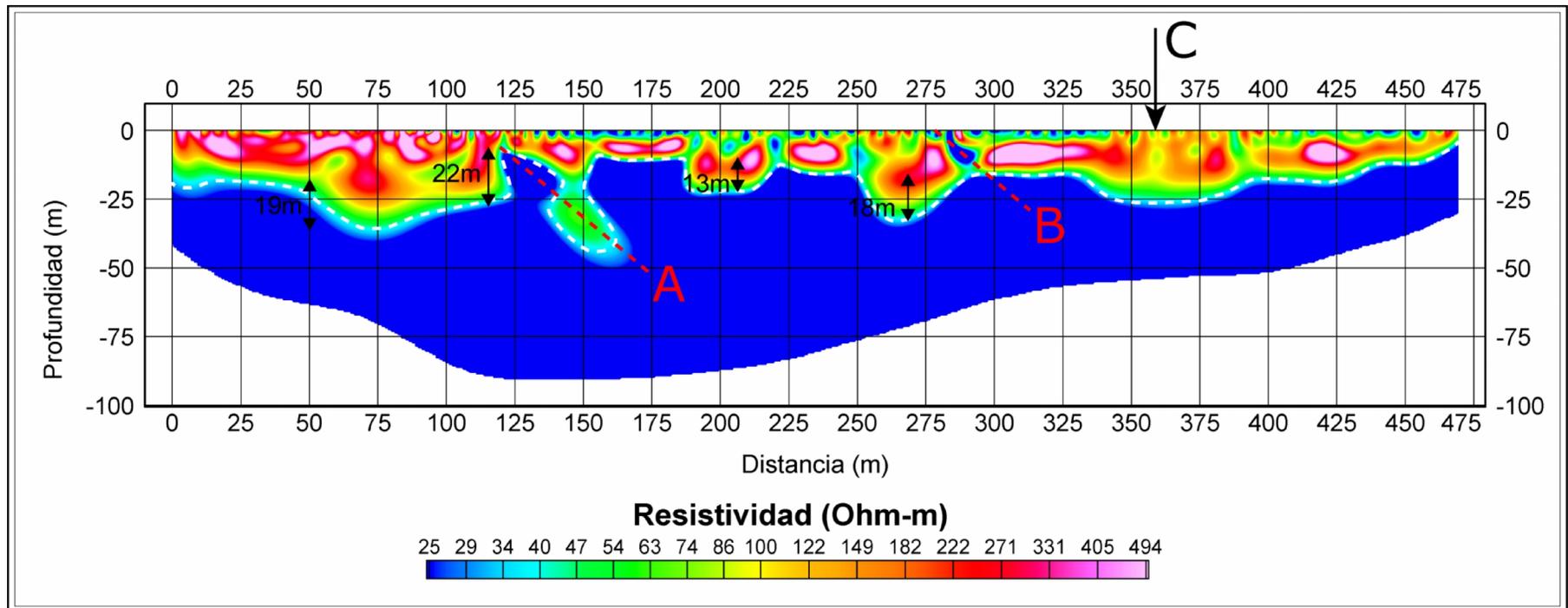


Figura 7.6: Modelo de resistividad del perfil Escrivá. La línea blanca segmentada aprox. delimita las unidades de baja y alta resistividad reconocibles en el modelo. La flecha vertical indica la intersección en superficie entre el perfil y la traza inferida (C) por Armijo et al. (2010) y Rauld (2011). La línea roja indica los planos de falla interpretados en este trabajo, con ángulo de 40° (A y B) respecto de la horizontal. Se observan cambios abruptos en el espesor de la unidad superficial de alta resistividad entre 13m y 22m, aproximadamente.

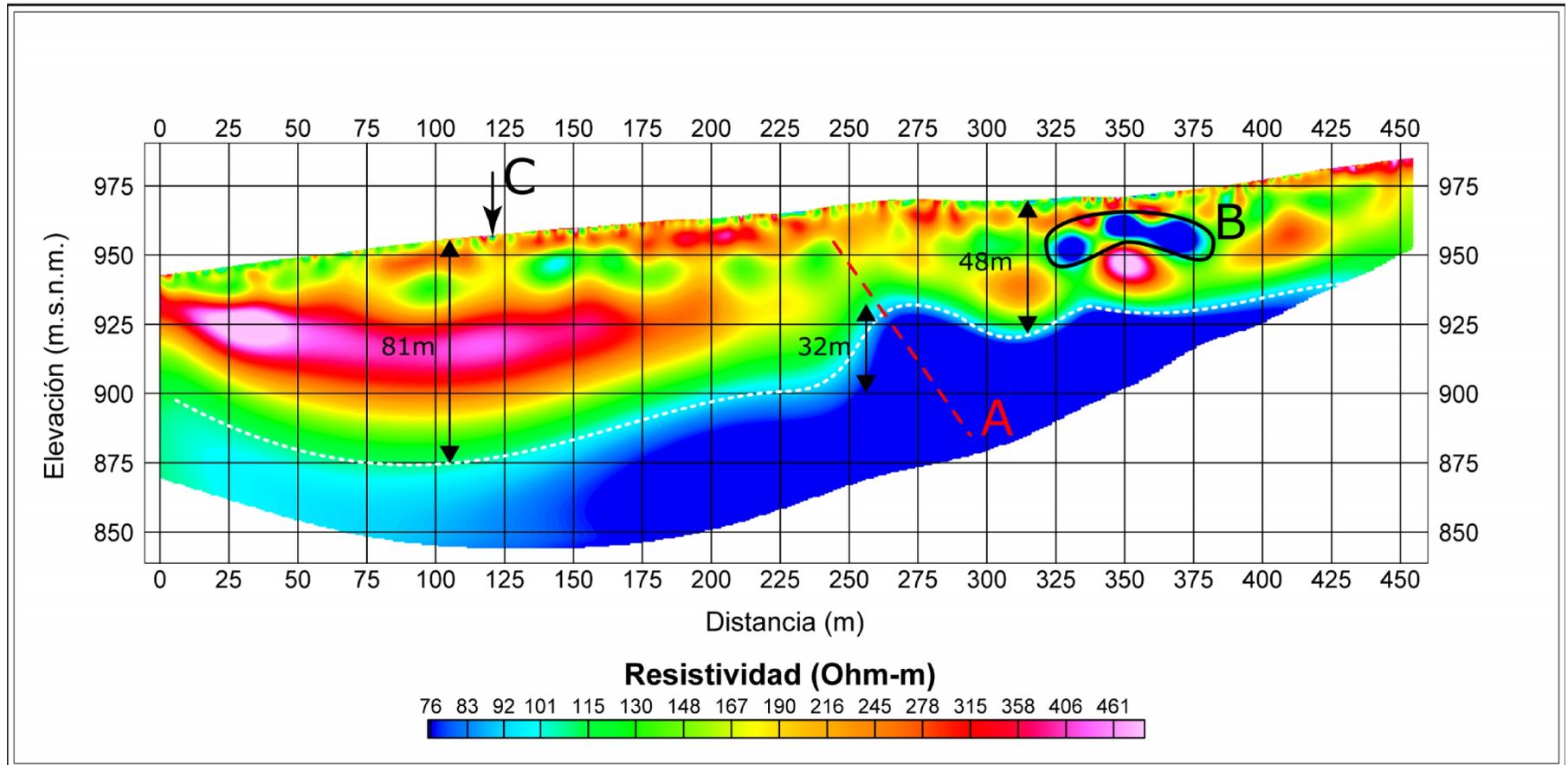


Figura 7.7: Modelo de resistividad del perfil Panul. La línea blanca segmentada aprox. delimita las unidades de baja y alta resistividad reconocibles en el modelo. La flecha vertical indica la intersección en superficie entre el perfil y la traza inferida (C) por Armijo et al. (2010) y Rauld (2011). La línea roja indica el plano de falla (A) interpretado en este trabajo, con ángulo de 55° respecto a la horizontal. Se observa un aumento del espesor de la unidad de alta resistividad al Este del plano de falla interpretado. Entre los 325m y 375m del perfil se interpreta un posible lente de material de distinta composición al circundante (B).

7.6 Resumen

En general la estructura de resistividad de los perfiles presenta patrones que se repiten entre ellos, conformando una estructura característica de resistividad, vinculada a la presencia de la Falla San Ramón.

Los perfiles reprocesados en esta tesis, Quebrada de Macul y San Ramón, cumplen con tener a lo largo de ellos escarpes de falla (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011). En particular, en Quebrada de Macul el escarpe de falla ha dado pie a la observación directa del plano de falla (Vargas et al., 2014). La principal diferencia superficial entre estos perfiles es la extensión de la cobertura del abanico aluvial moderno. En Quebrada de Macul el abanico moderno cubre la mayor parte del perfil, pero si se observa la estructura de resistividad por debajo de esta cobertura, la estructura de resistividad es muy similar a la observada en el perfil San Ramón (Figura 7.8), con un marcado contraste de resistividad entre los lados Este y Oeste de la falla.

En el perfil San Ramón (Figuras 7.4 y 7.8) se ha correlacionado una disminución de resistividad a 80m de profundidad en el lado Oeste con un aumento en el contenido de fluidos. La ausencia de un cambio similar en el lado Este, sumado a su baja resistividad, permite asumir un alto contenido de fluidos que no disminuye significativamente en profundidad. Esto indica que el plano de falla actuaría como una barrera para la migración de fluidos. En el perfil Quebrada de Macul se repite este comportamiento (Figura 7.8), con la salvedad de que los valores de resistividad en el bloque colgante son más altos, lo que se explica por un menor contenido de fluidos, acorde a un nivel estático más profundo (125m-150m en figura 7.2, Muñoz et al., 2015).

Los perfiles Quebrada de Macul y Panul (Figura 7.9) presentan muchas similitudes. Ambos presentan en superficie principalmente depósitos correspondientes al abanico aluvial moderno, con edades del Pleistoceno Superior y Holoceno. La cobertura de estos perfiles muestra un engrosamiento de Este a Oeste y fuertes cambios de espesor en torno a las zonas donde se ha interpretado y/u observado el plano de la Falla San Ramón.

El patrón de disminución del espesor de la cobertura aluvial moderna en torno al plano de falla interpretado se observa en los perfiles Quebrada de Macul, Panul y Escrivá (Figura 7.10); en todos ellos la superficie se encuentra mayoritariamente cubierta por el abanico moderno, a diferencia

del perfil San Ramón. Entre los perfiles donde predomina la cobertura aluvial moderna se observa una marcada heterogeneidad de la resistividad de la cobertura. Este es particularmente evidente en los perfiles Quebrada de Macul y Escrivá entre los planos de falla interpretados (Figura 7.10, elementos A y B en cada perfil), donde se observa una disminución local del espesor de cobertura, la cual muestra múltiples cambios de espesor. En el perfil Panul este comportamiento se observa al Este del plano de falla (Figura 7.10).

El plano de falla en los perfiles Quebrada de Macul y Panul, ubicados al Sur de la sección estructural B (Figura 7.1) se presenta con un manteo de 55°E, similar a lo observado globalmente en otros estudios (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011; Pérez et al., 2013). Esto cambia en los perfiles San Ramón y Escrivá, cercanos a la sección estructural A (Figura 7.1), donde el manteo del plano de falla es de 30°E y 40°E, respectivamente. Rauld (2011) observa en la unidad conformada por los cerros Calán, Apoquindo y Los Rulos una complejidad estructural, la cual explica por posibles cuñas de roca basal o por cambios de ángulo en el plano de falla. La información provista por estos modelos de resistividad indica que detrás de dicha complejidad estructural se encontrarían cambios en el ángulo del plano de falla.

El perfil Escrivá muestra similitudes en el comportamiento de la cobertura aluvial con el observado en los perfiles Quebrada de Macul y Panul. Sin embargo, una característica que lo destaca de los demás perfiles es la baja profundidad del nivel estático en el sector (12m según registros de la DGA, en torno a 30m según Muñoz et al., 2015). Esto se vería reflejado en la uniformidad y bajos valores de resistividad de la unidad inferior, lo que contribuiría a destacar los cambios de espesor en la cobertura, la que tendría una baja permeabilidad.

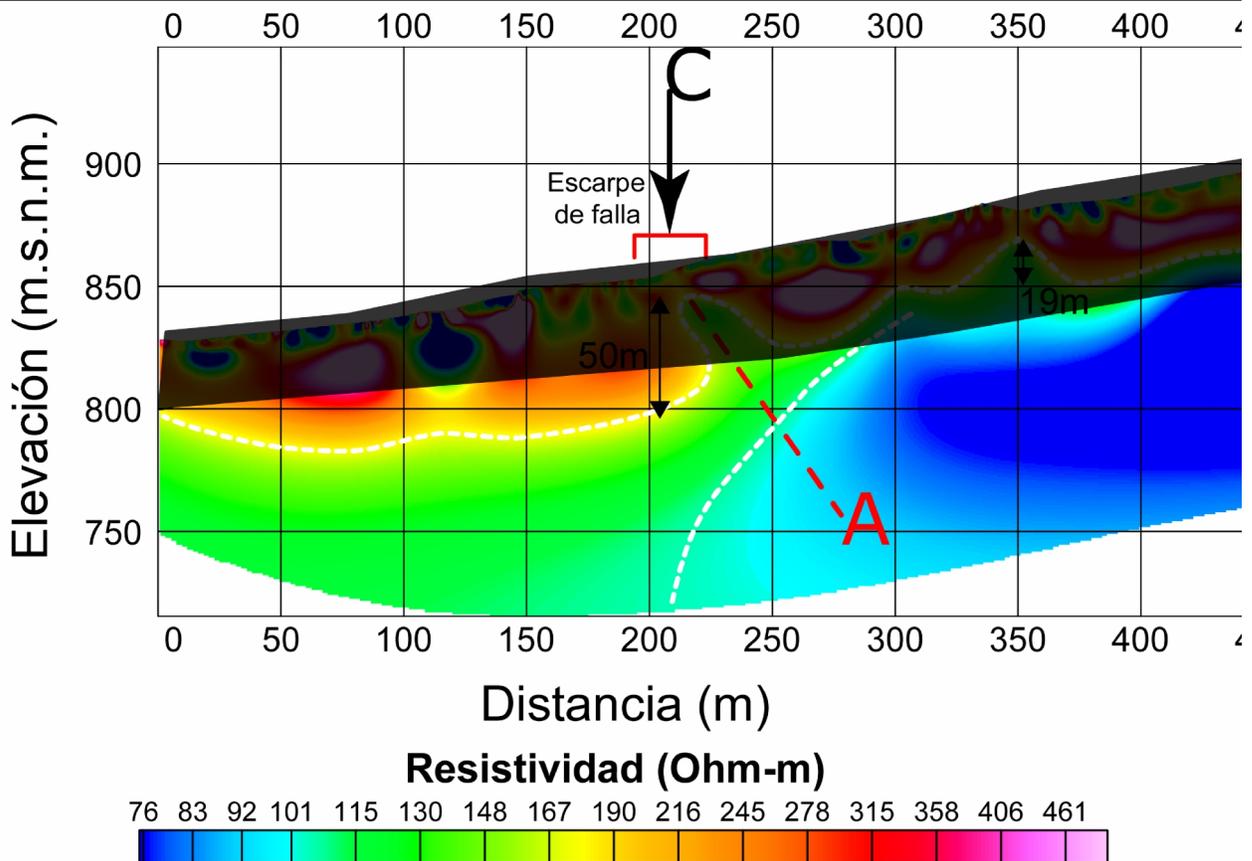
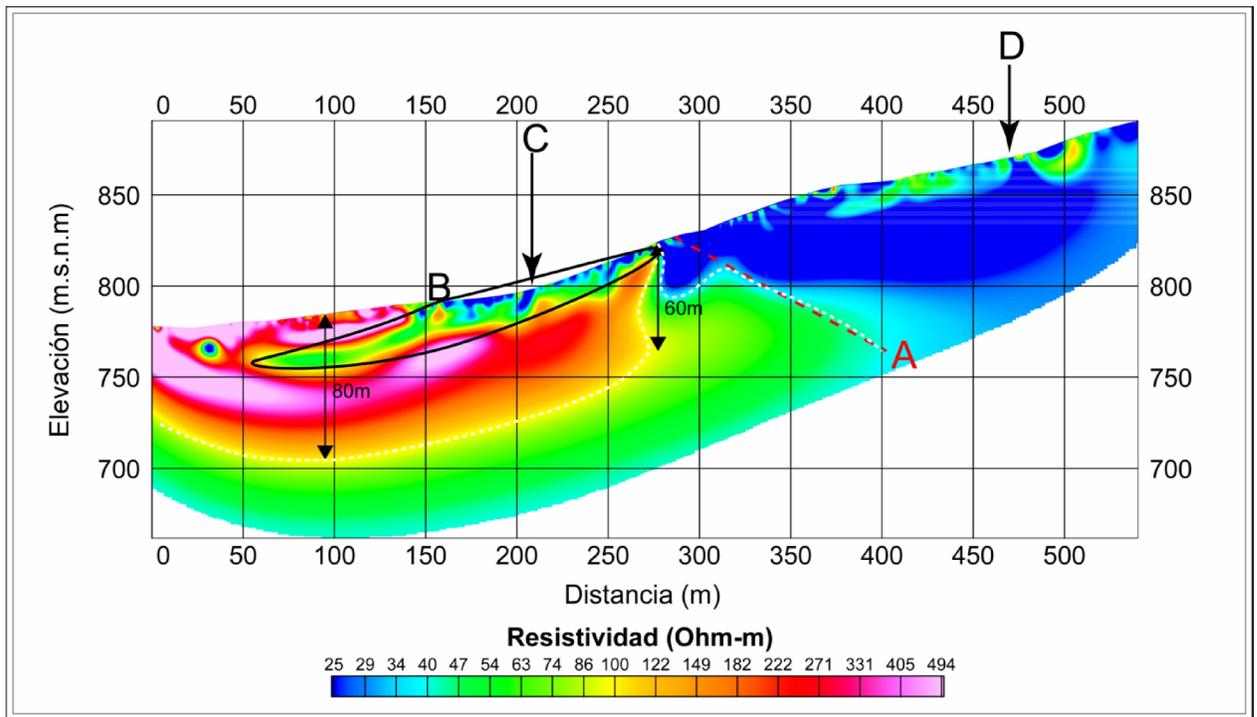


Figura 7.8: Modelos del perfil San Ramón (arriba) y Quebrada de Macul (abajo). En torno a la traza de la falla y por debajo de la cobertura aluvial moderna, el modelo de la Quebrada de Macul muestra características muy similares a las vistas en el perfil San Ramón.

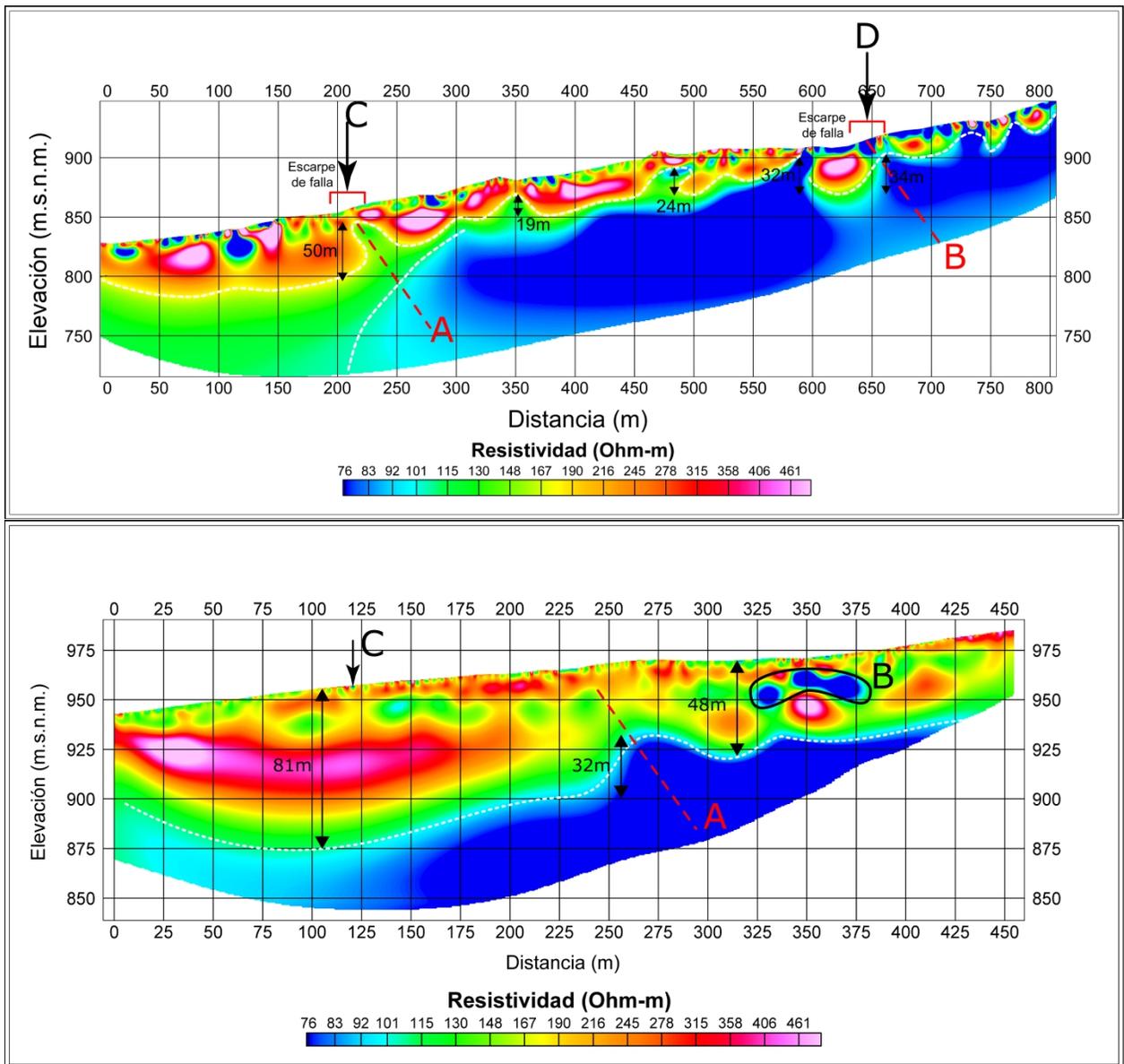


Figura 7.9: Modelos de los perfiles Quebrada de Macul (arriba) y Panul. En ambos perfiles se observa un aumento del espesor de la cobertura al Oeste de la traza de falla. Localmente, la traza de falla provoca una marcada disminución del espesor.

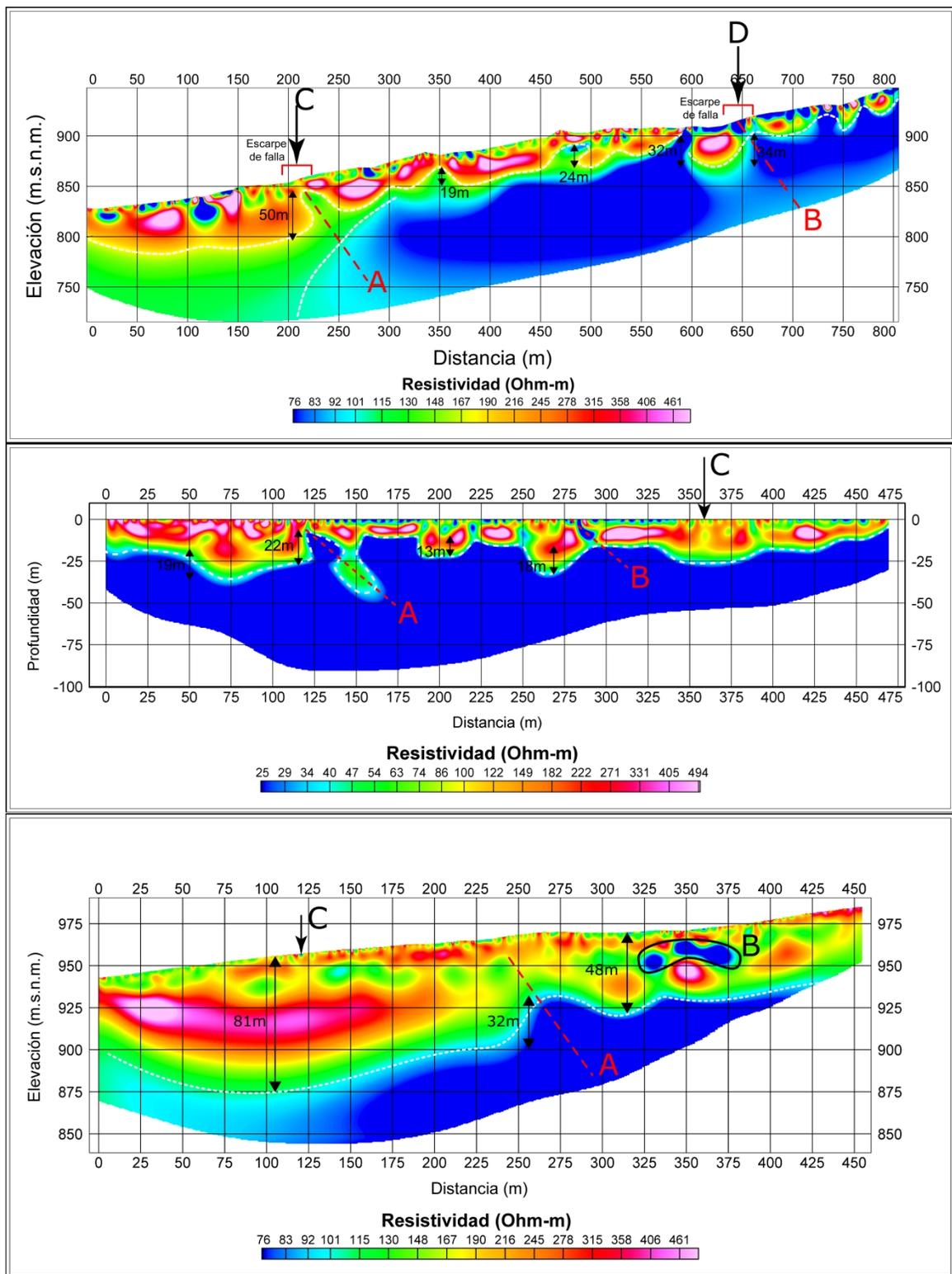


Figura 7.10: Modelos de los perfiles Quebrada de Macul (arriba), Escrivá (centro) y Panul (abajo). Entre los planos de falla interpretados (A y B en Quebrada de Macul y Escrivá) la cobertura disminuye su espesor comparado con lo observado al Este y Oeste, y se presenta con mayor irregularidad. En el caso del perfil Panul, esta irregularidad se observa al Este del plano de falla, pero no al Oeste.

Capítulo 8

Conclusiones

Se obtuvieron modelos de resistividad eléctrica 2D para cuatro perfiles de tomografía de resistividad eléctrica ubicados en el sector oriente de la ciudad de Santiago, en zonas donde se ha observado y/o inferido la traza de la Falla San Ramón y sus ramificaciones. Estos modelos permitieron la caracterización de la estructura de resistividad eléctrica somera de dichas zonas y establecer vínculos entre los rasgos observados y la presencia de la traza de la Falla San Ramón.

El análisis de la información morfoestratigráfica en la zona de estudio permite identificar rangos de resistividad característicos para los distintos tipos de depósitos sedimentarios reconocidos. Entre distintas zonas se repite la ocurrencia de unidades con rangos de resistividad característicos coincidentes con tipos específicos de depósitos sedimentarios mapeados. Es así como se observa que los depósitos modernos, con edades del Pleistoceno Superior y más jóvenes se correlacionan con resistividades eléctricas por sobre los 150 Ohm-m, los depósitos del Pleistoceno Medio y Superior presentan resistividades en el rango de 25 a 150 Ohm-m, mientras que los depósitos del Pleistoceno Inferior y Medio presentan resistividad por debajo de los 25 Ohm-m. Se establece entonces una tendencia a la disminución de resistividad con el aumento de la edad de los depósitos, la que tiene su origen en el mayor contenido de limos y arcillas en los depósitos de mayor edad.

En el piedemonte los niveles estáticos observados se ubican, en general, por debajo o en torno a las profundidades máximas alcanzadas por los modelos de resistividad; sin embargo existe circulación de fluidos en los depósitos sedimentarios someros, provenientes de la infiltración superficial. La diferencia de resistividad entre los lados Este y Oeste de la falla, indica que cerca de la superficie, la falla actúa como una barrera para el transporte de fluidos. Consecuentemente, este cambio en las condiciones de permeabilidad en el plano de la falla condicionaría la profundización de los niveles estáticos al Oeste de la falla.

El contraste de resistividad observada entre depósitos de distintas edades, particularmente entre los abanicos modernos del Pleistoceno Superior y Holoceno y los depósitos del Pleistoceno Superior y más antiguos, permite estimar el espesor de la cobertura aluvial moderna y mapear el contacto entre estos depósitos y los subyacentes. Los cambios abruptos de nivel en el límite inferior de los depósitos modernos presentan una buena correlación con la ubicación de la traza de la Falla San Ramón en las zonas donde ésta ha sido observada e interpretada. Por lo tanto puede ser considerado un indicador de la presencia y actividad de la falla y/o sus ramificaciones con posterioridad al emplazamiento de los abanicos perturbados.

En base a las diferencias de resistividad observadas entre depósitos de distintas edades y el cambio en las condiciones de permeabilidad que presenta la Falla San Ramón en superficie, es posible identificar su traza aún por debajo de la cobertura sedimentaria utilizando la Tomografía de Resistividad Eléctrica, tal como ha sido aplicada en el presente trabajo, para profundidades menores a 100m.

A partir de la interpretación de los perfiles Escrivá y Panul se ha podido precisar mejor la ubicación de la traza de la falla, anteriormente sólo inferida. Se comprueba además, que los estudios de superficie no siempre son suficientes para la correcta localización de la falla, tal como ha sido en el caso del perfil San Ramón.

En lo que respecta a futuros trabajos, se plantea el uso extensivo de la metodología presentada en este trabajo para el mapeo de la Falla San Ramón. Esta metodología no se limita a las zonas donde su traza se ha observado o inferido; puede ser también aplicada en zonas donde no se tiene información para, por ejemplo, identificar la continuación al norte y al sur del segmento actualmente conocido entre los ríos Mapocho y Maipo. Adicionalmente, aumentar el alcance en profundidad de las futuras mediciones podría permitir identificar el basamento rocoso y posibles cambios abruptos en su nivel. La aplicabilidad de esta metodología no se limita al estudio de la Falla San Ramón, siendo posible adaptarla y escalarla al estudio de otras fallas.

Bibliografía

- [1] Aguirre, L., 1960. Geología de los Andes de Chile central. Boletín N°9. Instituto de investigaciones geológicas (IIG), Santiago, 70p.
- [2] Andrews, R.J., Barker, R. y Loke, M.H., 1995. The application of electrical tomography in the study of the unsaturated zone in chalk at three sites in Cambridgeshire, United Kingdom. Hydrogeology Journal, vol. 4, 17-31.
- [3] Araneda, M., Avendaño, M. y Merlo, C., 2000. Modelo gravimétrico de la cuenca de Santiago, etapa III final. IX Congreso Geológico Chileno, Actas, vol. 2, 404-408.
- [4] Archie, G. E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining reservoir some characteristics. Transactions of American Institute of Mining Metallurgical Engineers, vol. 146, 54-62.
- [5] Archie, G. E., 1947. Electrical resistivity as an aid in core analysis interpretation. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 31, 350-366.
- [6] Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R. y Kausel, E., 2006. Tectonics of the western front of the Andes and its relation with subduction processes: The San Ramón Fault and associated seismic hazard for Santiago (Chile). Conferencia internacional Montessus de Ballore: Centenario del terremoto de Valparaíso de 1906, Abstract N°ST1-03, Santiago, Chile.
- [7] Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R. y Kausel, E., 2010. The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. Tectonics, 29 (2), TC2007, doi:10.1029/2008TC002427.
- [8] Borde, J., 1966. Les Andes de Santiago et leur avant-pays: Etude de Géomorphologie. Tesis de doctorado, Université de Bordeaux, Francia, Bordeaux. 599p.
- [9] Brüggén, J., 1950. Fundamentos de la Geología de Chile. Instituto Geográfico Militar, Santiago.

- [10] Caine, J. S., Evans, J. P. y Forster, C. B., 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025–1028.
- [11] Calamai, P. H. y Moré, J.J., 1987. Projected gradient methods for linearly constrained problems. *Mathematical programming*, 39, 96-116.
- [12] Carter, W. y Aguirre, L., 1965. Structural Geology of Aconcagua province and its relationship to the Central Valley Graben, Chile. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 76, 651-664.
- [13] Case, J., 2012. Inspection of earthen embankment dams using time lapse electrical resistivity tomography. Tesis para optar al grado de Master en Ciencias, Departamento de Ingeniería Civil, University of Mississippi. 102p.
- [14] Dahlin, T. y Loke, M. H., 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 38, 237-249.
- [15] De Groot-Hedlin, C. y Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- [16] Dey, A. y Morrison, H.F. 1979a. Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 27, 106-136.
- [17] Dey, A. y Morrison, H.F., 1979b. Resistivity modeling for arbitrarily shaped threedimensional shaped structures. *Geophysics*, 44, 753-780.
- [18] Díaz, D., Maksymowicz, A., Vargas, G., Vera, E., Contreras-Reyes, E. y Rebolledo, S., 2014. Exploring the shallow structure of the San Ramón thrust fault in Santiago, Chile ($\sim 33.5^\circ\text{S}$), using active seismic and electric methods. *Solid Earth*, 6, 339-375.
- [19] Edwards, L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- [20] Ekblom, H., 1973. Calculation of linear best L_p -approximation. *BIT Numerical Mathematics*, 13, 292-300.
- [21] Ekblom, H., 1987. The L_1 -estimate as limiting case of an L_p - or Huber-estimate. In *International Conference on Statistical Data Analysis Based on the L_1 -norm and related methods*, No. 4, 109-116. Neuchatel.

- [22] Ellis, R.G. y Oldenburg, D.W., 1994. The pole-pole 3-D DC-resistivity inverse problem: a conjugate-gradient approach. *Geophysical Journal International*, 119, 187-194.
- [23] Equipo de validación ASTER GDEM, 2011. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. Disponible en línea, accesado el 28 de Julio de 2014.
http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf
- [24] Farías, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., Cáceres, J. y Comte, D., 2008. Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33°–35°S), *Tectonics*, 27, TC1005, doi:10.1029/2006TC002046.
- [25] Farquharson, C.G. y Oldenburg, D.W., 1998. Non-linear inversion using general measures of data misfit and model structure. *Geophysical Journal International*, 134, 213-227.
- [26] Fock, A., 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, Mención Geología y Memoria para optar al título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- [27] Gana, P., Wall, R. y Gutiérrez, A., 1996. Mapa geológico del área Valparaíso-Curacaví, región de Valparaíso y región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, N°1, escala 1:100.000.
- [28] Griffiths, D.H. y Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 29, 211–226.
- [29] Kausel, E., 1959. Estudio gravimétrico en la cuenca de Santiago. Memoria para optar al título de Ingeniero civil de minas, Universidad de Chile. 104p.
- [30] Lesmes, D. P. y Friedman, S. P., 2005. Relationships between the electrical and hydrogeological properties of rock and soils. En: Rubin, Y., Hubbard, S. S. (eds), *Hydrogeophysics*. Springer, Dordrecht, Holanda, cap. 4, 87-128.
- [31] Loke, M.H., 2001. Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Course Notes for USGS Workshop 2-D and 3-D Inversion and Modeling of Surface and Borehole Resistivity Data, Storrs, CT.

- [32] Loke, M.H.; Acworth, I. y Dahlin, T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34, 182-187.
- [33] McGillivray, P.R.,. 1992. Forward modeling and inversion of DC resistivity and MMR data. PhD thesis, Department of Geophysics and Astronomy, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- [34] Muñoz, M., Garata, P., Flores-Aqueveque, V., Vargas, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S., Daniele, L., Morata, D. y Parada, M.A., 2015. Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin - Chile (33,5°S). *Renewable Energy*, vol. 76, 186-195.
- [35] Naranjo, J.A. y Varela, J., 1996. Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de mayo de 1993. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- [36] Oldenburg, D. W., McGillivray, P. R. y Ellis, R. G., 1993. Generalized subspace method for large scale inverse problems. *Geophysical Journal International*, 114, 12-20.
- [37] Okpoli, C. C., 2013. Sensitivity and resolution capacity of electrode configurations. *International Journal of Geophysics*, vol. 2013, 12p. doi :10.1155/2013/608037.
- [38] Palacky, G. J., 1987. Resistivity characteristics of geologic targets. En: Nabighian, M. N. (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Society of exploration geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA, vol. 1, cap.3, 52-129.
- [39] Pérez, A., Ruiz, J.A., Vargas, G., Rebolledo, S. y Campos, J., 2013. Improving seismotectonics and seismic hazard assesment along the San Ramón fault at the Eastern border Santiago city, Chile. *Natural Hazards*, doi:10.1007/s11069-013-0908-3.
- [40] Rauld, R., 2002. Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago oriente, entre el río Mapocho y la quebrada de Macul. Memoria para optar al título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile. 57p.
- [41] Rauld, R., Vargas, G., Armijo, R., Ormeño, A., Valderas, C. y Campos, J., 2006. Cuantificación de escarpes de falla y deformación reciente en el frente cordillerano de Santiago. XI Congreso Geológico Chileno, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.

- [42] Rauld, R., 2011. Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S). Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, Mención Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- [43] Ren, Z. y Tang, J., 2010. 3D direct current resistivity modeling with unstructured mesg by adaptive finite-element method. *Geophysics*, 75, H7-H17.
- [44] Robinson, E. S., 1989. Current lines Radiating from the Source Electrode and converging on the Sink Electrode. En *Field Geophysics*, Open University Press and Halsted press Inc.
- [45] Rutley, A.; Oldenburg, D.W.; Shekhtman, R., 2001. 2-D and 3-D IP/Resistivity inversion for the interpretation of Isa-style targets. In *ASEG Geophysical Conference and Exhibition, No 15, Extended Abstracts 1, 1-4*. Brisbane.
- [46] Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A. y Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*, vol. 83, 173-193.
- [47] Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.
- [48] Seaton, W.J. y Burbey, T. J., 2002. Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 51, 21-41.
- [49] Sepúlveda, S.A., S. Rebolledo, y Vargas, G., 2006. Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. *Quaternary International*, vol. 158, 83-95.
- [50] Spitzer, K., 1995. A 3-D finite-difference algorithm for DC resistivity modeling using conjugate gradient methods. *Geophysical Journal International*, 123, 903-914.
- [51] Thiele, R., 1980. Geología de la hoja Santiago, Región Metropolitana. *Carta Geológica de Chile, escala 1:250.000*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago. 51p.
- [52] Tricart, J., Hirsch, A.R. y Griesbach, J.C., 1965. Geomorphologie et eaux souterraines dans le basin de Santiago du Chili. *Bulletin de la Faculté des lettres de Strasbourg*, 7, 605-673.

- [53] Vargas, G. y Rebolledo, S., 2012. Paleosismología de la falla San Ramón e implicancias para el peligro sísmico de Santiago. XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile, Abstracts, 851–853.
- [54] Vargas, G., Klinger, Y., Rockwell, T.K., Forman, S.L., Rebolledo, S., Baize, S., Lacassin, R. y Armijo, R., 2014. Probing large intra-plate earthquakes at the west flank of the Andes. *Geology*, doi:10.1130/G35741.1.
- [55] Waxman y Smits, 1968. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 8, 107-122.
- [56] Yañez, G., Muñoz, M., Flores-Aqueveque, V. y Bosch, A., 2015. Gravity derived depth to basement in Santiago Basin, Chile: implications for its geological evolution, hydrogeology, low enthalpy geothermal, soil characterization and geo-hazards. *Andean Geology*, vol. 42 (2), 147-172.

Anexo A

Coordenadas DGPS de electrodos

A continuación se presentan las tablas que contienen las coordenadas DGPS registradas para los perfiles San Ramón, Quebrada de Macul y Panul. Se entrega además información la posición nominal de los electrodos, largo acumulado del perfil y la distancia promedio entre electrodos por tramos con coordenadas. Esta información se entrega calculada en planta y superficie, de forma de dimensionar el acortamiento por efecto de la topografía.

Tabla A.1: Posición DGPS del perfil San Ramón y posiciones relativas 2-D (UTM 19S, WGS84).

| Electrodo # | Posición DGPS Reportada (UTM 19S, WGS84) | | | Posición nominal de los electrodos (m) | | Largo acumulado del perfil (m) | | Distancia promedio por tramo entre electrodos (m) | |
|-------------|---|------------|---------|---|--------|-----------------------------------|--------|---|--------|
| | Este(m) | Norte(m) | Cota(m) | Superficie | Planta | Superficie | Planta | Superficie | Planta |
| 1 | 358341.20 | 6300071.82 | 778.35 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - |
| 4 | 358363.25 | 6300069.64 | 776.93 | 21 | 20.95 | 22.20 | 22.16 | 7.40 | 7.39 |
| 6 | 358376.01 | 6300068.09 | 778.70 | 35 | 34.84 | 35.18 | 35.01 | 6.49 | 6.43 |
| 8 | 358388.93 | 6300066.63 | 780.39 | 49 | 48.74 | 48.29 | 48.01 | 6.56 | 6.50 |
| 11 | 358409.66 | 6300067.73 | 781.36 | 70 | 69.71 | 69.07 | 68.77 | 6.93 | 6.92 |
| 37 | 358588.74 | 6300078.68 | 811.97 | 252 | 249.12 | 251.08 | 248.19 | 7.00 | 6.90 |
| 38 | 358594.50 | 6300076.48 | 814.13 | 259 | 255.78 | 257.61 | 254.35 | 6.53 | 6.17 |
| 39 | 358605.41 | 6300075.39 | 818.19 | 266 | 261.48 | 269.30 | 265.32 | 11.69 | 10.96 |
| 42 | 358619.31 | 6300072.37 | 824.40 | 287 | 281.54 | 284.82 | 279.54 | 5.17 | 4.74 |
| 44 | 358632.02 | 6300070.08 | 828.27 | 301 | 295.00 | 298.31 | 292.46 | 6.74 | 6.46 |
| 45 | 358644.59 | 6300069.96 | 830.66 | 308 | 301.58 | 311.10 | 305.03 | 12.80 | 12.57 |
| 47 | 358657.21 | 6300067.59 | 836.08 | 322 | 314.49 | 325.04 | 317.87 | 6.97 | 6.42 |
| 50 | 358670.75 | 6300063.60 | 840.86 | 343 | 334.93 | 339.94 | 331.98 | 4.97 | 4.71 |
| 52 | 358683.23 | 6300067.29 | 845.46 | 357 | 348.16 | 353.75 | 345.00 | 6.90 | 6.51 |
| 53 | 358694.23 | 6300066.68 | 848.86 | 364 | 354.28 | 365.28 | 356.01 | 11.53 | 11.02 |
| 55 | 358706.40 | 6300062.58 | 852.51 | 378 | 367.79 | 378.63 | 368.86 | 6.68 | 6.42 |
| 57 | 358719.19 | 6300061.71 | 855.52 | 392 | 381.46 | 391.79 | 381.68 | 6.58 | 6.41 |
| 59 | 358734.44 | 6300057.89 | 856.73 | 406 | 395.41 | 407.56 | 397.40 | 7.88 | 7.86 |
| 61 | 358748.34 | 6300054.02 | 858.15 | 420 | 409.34 | 422.06 | 411.83 | 7.25 | 7.21 |
| 63 | 358760.29 | 6300053.43 | 861.29 | 434 | 422.98 | 434.43 | 423.79 | 6.18 | 5.98 |
| 65 | 358773.37 | 6300051.40 | 863.25 | 448 | 436.85 | 447.81 | 437.03 | 6.69 | 6.62 |
| 67 | 358786.23 | 6300047.13 | 865.96 | 462 | 450.58 | 461.63 | 450.58 | 6.91 | 6.78 |
| 69 | 358799.10 | 6300043.73 | 868.23 | 476 | 464.40 | 475.13 | 463.89 | 6.75 | 6.66 |
| 71 | 358811.44 | 6300038.78 | 871.08 | 490 | 478.10 | 488.73 | 477.18 | 6.80 | 6.65 |
| 73 | 358824.21 | 6300032.71 | 873.68 | 504 | 491.86 | 503.11 | 491.32 | 7.19 | 7.07 |
| 75 | 358837.22 | 6300032.38 | 878.80 | 518 | 504.89 | 517.09 | 504.34 | 6.99 | 6.51 |
| 77 | 358849.12 | 6300028.81 | 883.04 | 532 | 518.23 | 530.22 | 516.76 | 6.56 | 6.21 |
| 81 | 358879.07 | 6300019.36 | 890.75 | 560 | 545.15 | 562.56 | 548.17 | 8.08 | 7.85 |

Tabla A.2: Posición DGPS del perfil Quebrada de Macul y posiciones relativas 2-D (UTM 19S, WGS84).

| Electrodo # | Posición DGPS Reportada (UTM 19S, WGS84) | | | Posición nominal de los electrodos (m) | | Largo acumulado del perfil (m) | | Distancia promedio por tramo entre electrodos (m) | |
|-------------|--|------------|---------|--|--------|--------------------------------|--------|---|--------|
| | Este(m) | Norte(m) | Cota(m) | Superficie | Planta | Superficie | Planta | Superficie | Planta |
| 1 | 358509.08 | 6293308.71 | 828.33 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - |
| 3 | 358520.75 | 6293314.87 | 827.53 | 14 | 13.98 | 13.22 | 13.20 | 6.61 | 6.60 |
| 5 | 358535.92 | 6293313.88 | 829.31 | 28 | 27.86 | 28.53 | 28.40 | 7.65 | 7.60 |
| 7 | 358548.39 | 6293313.10 | 830.76 | 42 | 41.79 | 41.10 | 40.89 | 6.29 | 6.25 |
| 9 | 358562.63 | 6293313.28 | 831.91 | 56 | 55.74 | 55.39 | 55.13 | 7.14 | 7.12 |
| 11 | 358576.24 | 6293312.43 | 833.59 | 70 | 69.64 | 69.13 | 68.77 | 6.87 | 6.82 |
| 13 | 358589.99 | 6293311.59 | 835.05 | 84 | 83.56 | 82.98 | 82.55 | 6.93 | 6.89 |
| 15 | 358603.54 | 6293310.57 | 836.77 | 98 | 97.46 | 96.68 | 96.13 | 6.85 | 6.79 |
| 17 | 358616.42 | 6293307.78 | 839.30 | 112 | 111.23 | 110.10 | 109.31 | 6.71 | 6.59 |
| 19 | 358629.59 | 6293308.33 | 840.51 | 126 | 125.17 | 123.34 | 122.49 | 6.62 | 6.59 |
| 21 | 358642.78 | 6293305.93 | 844.62 | 140 | 138.56 | 137.36 | 135.90 | 7.01 | 6.70 |
| 22 | 358654.80 | 6293302.10 | 846.59 | 147 | 145.27 | 150.13 | 148.52 | 12.77 | 12.62 |
| 23 | 358656.40 | 6293304.51 | 848.56 | 154 | 151.99 | 153.63 | 151.41 | 3.50 | 2.89 |
| 25 | 358669.99 | 6293305.79 | 850.35 | 168 | 165.88 | 167.40 | 165.06 | 6.88 | 6.83 |
| 27 | 358683.71 | 6293305.87 | 851.27 | 182 | 179.85 | 181.15 | 178.78 | 6.88 | 6.86 |
| 29 | 358696.93 | 6293308.12 | 851.96 | 196 | 193.83 | 194.57 | 192.19 | 6.71 | 6.71 |
| 31 | 358711.02 | 6293308.01 | 853.64 | 210 | 207.73 | 208.76 | 206.28 | 7.10 | 7.05 |
| 33 | 358724.48 | 6293308.47 | 858.58 | 224 | 220.83 | 223.11 | 219.75 | 7.17 | 6.73 |
| 35 | 358738.20 | 6293306.23 | 862.13 | 238 | 234.37 | 237.46 | 233.65 | 7.17 | 6.95 |
| 37 | 358751.75 | 6293305.70 | 864.14 | 252 | 248.23 | 251.17 | 247.21 | 6.85 | 6.78 |
| 39 | 358765.04 | 6293304.10 | 866.20 | 266 | 262.07 | 264.71 | 260.60 | 6.77 | 6.69 |
| 41 | 358778.78 | 6293303.99 | 868.47 | 280 | 275.89 | 278.64 | 274.34 | 6.96 | 6.87 |
| 43 | 358793.86 | 6293304.30 | 868.40 | 294 | 289.89 | 293.72 | 289.42 | 7.54 | 7.54 |
| 45 | 358806.67 | 6293306.73 | 872.89 | 308 | 303.15 | 307.51 | 302.46 | 6.89 | 6.52 |
| 47 | 358819.94 | 6293306.11 | 876.61 | 322 | 316.64 | 321.30 | 315.74 | 6.90 | 6.64 |
| 49 | 358833.88 | 6293307.80 | 879.99 | 336 | 330.23 | 335.75 | 329.78 | 7.22 | 7.02 |
| 51 | 358846.10 | 6293310.51 | 883.83 | 350 | 343.69 | 348.84 | 342.30 | 6.55 | 6.26 |
| 53 | 358861.84 | 6293312.38 | 880.87 | 364 | 357.38 | 364.97 | 358.15 | 8.06 | 7.93 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|------------|--------|-----|--------|--------|--------|-------|-------|
| 55 | 358874.15 | 6293308.30 | 883.51 | 378 | 371.13 | 378.20 | 371.12 | 6.62 | 6.48 |
| 57 | 358887.80 | 6293308.79 | 884.49 | 392 | 385.09 | 391.89 | 384.78 | 6.85 | 6.83 |
| 59 | 358900.83 | 6293307.38 | 885.71 | 406 | 399.04 | 405.06 | 397.89 | 6.58 | 6.55 |
| 61 | 358914.67 | 6293305.26 | 888.84 | 420 | 412.68 | 419.40 | 411.89 | 7.17 | 7.00 |
| 63 | 358928.27 | 6293306.99 | 891.32 | 434 | 426.46 | 433.34 | 425.60 | 6.97 | 6.85 |
| 65 | 358941.77 | 6293310.12 | 894.38 | 448 | 440.12 | 447.53 | 439.45 | 7.10 | 6.93 |
| 67 | 358955.32 | 6293310.53 | 897.10 | 462 | 453.86 | 461.35 | 453.01 | 6.91 | 6.78 |
| 69 | 358967.56 | 6293310.66 | 898.42 | 476 | 467.79 | 473.67 | 465.25 | 6.16 | 6.12 |
| 71 | 358980.25 | 6293310.15 | 905.88 | 490 | 479.64 | 488.39 | 477.95 | 7.36 | 6.35 |
| 73 | 358995.43 | 6293309.81 | 902.75 | 504 | 493.29 | 503.90 | 493.14 | 7.75 | 7.59 |
| 75 | 359007.16 | 6293304.20 | 902.87 | 518 | 507.29 | 516.90 | 506.14 | 6.50 | 6.50 |
| 77 | 359019.10 | 6293297.28 | 905.77 | 532 | 520.98 | 531.00 | 519.94 | 7.05 | 6.90 |
| 79 | 359032.72 | 6293291.51 | 908.01 | 546 | 534.80 | 545.96 | 534.73 | 7.48 | 7.40 |
| 81 | 359044.95 | 6293292.28 | 907.49 | 560 | 548.79 | 558.23 | 546.98 | 6.13 | 6.13 |
| 83 | 359058.67 | 6293285.35 | 907.23 | 574 | 562.79 | 573.60 | 562.36 | 7.69 | 7.69 |
| 85 | 359072.10 | 6293285.00 | 908.17 | 588 | 576.76 | 587.07 | 575.79 | 6.73 | 6.72 |
| 87 | 359084.04 | 6293287.37 | 908.08 | 602 | 590.76 | 599.24 | 587.96 | 6.09 | 6.09 |
| 88 | 359097.06 | 6293286.74 | 907.61 | 609 | 597.74 | 612.29 | 601.00 | 13.04 | 13.04 |
| 91 | 359110.93 | 6293282.37 | 909.73 | 630 | 618.64 | 626.98 | 615.54 | 4.90 | 4.85 |
| 93 | 359125.05 | 6293280.01 | 908.10 | 644 | 632.54 | 641.39 | 629.86 | 7.20 | 7.16 |
| 95 | 359138.51 | 6293274.14 | 909.69 | 658 | 646.45 | 656.16 | 644.54 | 7.39 | 7.34 |
| 97 | 359149.69 | 6293270.57 | 913.66 | 672 | 659.88 | 668.55 | 656.28 | 6.19 | 5.87 |
| 98 | 359160.14 | 6293262.86 | 917.66 | 679 | 665.62 | 682.14 | 669.26 | 13.59 | 12.99 |
| 100 | 359169.79 | 6293257.25 | 920.17 | 693 | 679.39 | 693.58 | 680.43 | 5.72 | 5.58 |
| 102 | 359184.94 | 6293254.47 | 922.97 | 707 | 693.11 | 709.23 | 695.83 | 7.83 | 7.70 |
| 104 | 359198.62 | 6293255.97 | 924.22 | 721 | 707.05 | 723.05 | 709.59 | 6.91 | 6.88 |
| 106 | 359211.94 | 6293253.96 | 927.14 | 735 | 720.75 | 736.84 | 723.06 | 6.89 | 6.74 |
| 108 | 359226.13 | 6293252.14 | 929.65 | 749 | 734.52 | 751.36 | 737.37 | 7.26 | 7.15 |
| 110 | 359239.74 | 6293248.87 | 931.46 | 763 | 748.40 | 765.48 | 751.36 | 7.06 | 7.00 |
| 112 | 359252.79 | 6293245.99 | 930.14 | 777 | 762.34 | 778.90 | 764.73 | 6.71 | 6.68 |
| 114 | 359265.99 | 6293243.98 | 934.33 | 791 | 775.70 | 792.90 | 778.08 | 7.00 | 6.68 |
| 115 | 359272.03 | 6293243.90 | 937.54 | 798 | 781.92 | 799.74 | 784.12 | 6.84 | 6.04 |
| 116 | 359278.89 | 6293244.73 | 939.91 | 805 | 788.51 | 807.04 | 791.03 | 7.31 | 6.91 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|------------|--------|-----|--------|--------|--------|------|------|
| 117 | 359285.40 | 6293242.96 | 941.76 | 812 | 795.26 | 814.04 | 797.78 | 7.00 | 6.75 |
| 118 | 359291.89 | 6293241.22 | 943.37 | 819 | 802.07 | 820.95 | 804.50 | 6.91 | 6.72 |
| 119 | 359297.46 | 6293238.03 | 946.05 | 826 | 808.54 | 827.90 | 810.92 | 6.96 | 6.42 |
| 120 | 359303.67 | 6293235.44 | 947.10 | 833 | 815.46 | 834.71 | 817.64 | 6.81 | 6.73 |
| 121 | 359310.82 | 6293235.11 | 947.65 | 840 | 822.43 | 841.89 | 824.80 | 7.18 | 7.16 |

Tabla A.3: Posición DGPS del perfil Panul y posiciones relativas 2-D (UTM 19S, WGS84).

| Electrodo # | Posición DGPS Registrada (UTM 19S, WGS84) | | | Posición nominal de los electrodos (m) | | Largo acumulado del perfil (m) | | Distancia promedio por tramo entre electrodos (m) | |
|-------------|---|------------|---------|--|--------|--------------------------------|--------|---|--------|
| | Este(m) | Norte(m) | Cota(m) | Superficie | Planta | Superficie | Planta | Superficie | Planta |
| 1 | 358299.74 | 6289041.30 | 942.60 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0 | - | - |
| 2 | 358303.09 | 6289037.59 | 943.19 | 5 | 4.99 | 4.99 | 5.03 | 4.99 | 5.03 |
| 4 | 358310.16 | 6289030.82 | 944.31 | 15 | 14.78 | 14.79 | 14.89 | 4.90 | 4.93 |
| 6 | 358316.80 | 6289023.31 | 945.73 | 25 | 24.79 | 24.81 | 25.01 | 5.01 | 5.06 |
| 8 | 358323.44 | 6289016.03 | 947.05 | 35 | 34.64 | 34.66 | 34.95 | 4.93 | 4.97 |
| 10 | 358330.59 | 6289009.19 | 948.51 | 45 | 44.52 | 44.55 | 44.95 | 4.94 | 5.00 |
| 12 | 358336.98 | 6289001.52 | 949.58 | 55 | 54.48 | 54.54 | 54.99 | 4.99 | 5.02 |
| 14 | 358343.94 | 6288994.53 | 950.54 | 65 | 64.35 | 64.41 | 64.91 | 4.94 | 4.96 |
| 16 | 358350.72 | 6288987.29 | 951.97 | 75 | 74.27 | 74.33 | 74.93 | 4.96 | 5.01 |
| 18 | 358357.21 | 6288979.79 | 953.36 | 85 | 84.18 | 84.24 | 84.94 | 4.96 | 5.01 |
| 20 | 358363.84 | 6288972.53 | 954.37 | 95 | 94.01 | 94.08 | 94.83 | 4.92 | 4.94 |
| 22 | 358370.89 | 6288965.55 | 955.63 | 105 | 103.92 | 104.00 | 104.83 | 4.96 | 5.00 |
| 24 | 358377.12 | 6288957.98 | 956.51 | 115 | 113.71 | 113.80 | 114.67 | 4.90 | 4.92 |
| 25* | 358377.65 | 6288948.94 | 956.99 | 120* | 120.84 | - | - | - | - |
| 26 | 358384.97 | 6288949.31 | 957.61 | 125 | 125.40 | 125.50 | 126.42 | 5.85 | 5.87 |
| 27* | 358384.44 | 6288941.61 | 957.94 | 130* | 130.81 | - | - | - | - |
| 28 | 358391.67 | 6288942.38 | 958.49 | 135 | 135.04 | 135.14 | 136.10 | 4.82 | 4.84 |
| 29* | 358391.23 | 6288934.35 | 958.72 | 140* | 140.75 | - | - | - | - |
| 30 | 358398.36 | 6288934.58 | 959.48 | 145 | 145.31 | 145.42 | 146.42 | 5.14 | 5.16 |
| 31* | 358398.50 | 6288927.55 | 959.50 | 150* | 150.64 | - | - | - | - |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|------------|--------|------|--------|--------|--------|------|------|
| 32 | 358405.31 | 6288927.43 | 960.04 | 155 | 155.28 | 155.38 | 156.41 | 4.98 | 4.99 |
| 33* | 358405.86 | 6288920.84 | 960.13 | 160* | 160.53 | - | - | - | - |
| 34 | 358411.70 | 6288919.77 | 960.74 | 165 | 165.24 | 165.36 | 166.41 | 4.99 | 5.00 |
| 35* | 358413.23 | 6288913.90 | 961.39 | 170* | 170.61 | - | - | - | - |
| 36 | 358418.30 | 6288912.39 | 961.70 | 175 | 175.14 | 175.26 | 176.36 | 4.95 | 4.98 |
| 37* | 358420.20 | 6288907.28 | 962.26 | 180* | 180.20 | - | - | - | - |
| 38 | 358425.16 | 6288905.21 | 962.68 | 185 | 185.06 | 185.18 | 186.33 | 4.96 | 4.98 |
| 39* | 358427.64 | 6288900.50 | 962.73 | 190* | 190.22 | - | - | - | - |
| 40 | 358431.84 | 6288897.72 | 962.83 | 195 | 195.10 | 195.23 | 196.37 | 5.02 | 5.02 |
| 41* | 358435.31 | 6288894.10 | 963.17 | 200* | 200.11 | - | - | - | - |
| 42 | 358438.75 | 6288890.48 | 963.38 | 205 | 205.11 | 205.23 | 206.39 | 5.00 | 5.01 |
| 43* | 358442.46 | 6288887.22 | 964.07 | 210* | 210.02 | - | - | - | - |
| 44 | 358445.71 | 6288882.79 | 964.78 | 215 | 215.48 | 215.60 | 216.86 | 5.19 | 5.23 |
| 45* | 358449.67 | 6288880.45 | 964.91 | 220* | 219.89 | - | - | - | - |
| 46 | 358452.49 | 6288876.13 | 965.02 | 225 | 224.98 | 225.11 | 226.37 | 4.75 | 4.76 |
| 47* | 358457.14 | 6288873.93 | 965.85 | 230* | 229.75 | - | - | - | - |
| 48 | 358459.20 | 6288868.91 | 965.85 | 235 | 234.83 | 234.97 | 236.26 | 4.93 | 4.94 |
| 49 | 358464.23 | 6288866.81 | 966.97 | 240 | 239.79 | 240.42 | 241.82 | 5.45 | 5.56 |
| 51 | 358471.36 | 6288860.05 | 968.39 | 250 | 249.61 | 250.25 | 251.75 | 4.92 | 4.97 |
| 53 | 358478.50 | 6288853.11 | 969.40 | 260 | 259.56 | 260.20 | 261.76 | 4.98 | 5.00 |
| 55 | 358483.82 | 6288844.85 | 969.83 | 270 | 269.21 | 270.02 | 271.59 | 4.91 | 4.91 |
| 57 | 358488.51 | 6288835.94 | 970.02 | 280 | 278.93 | 280.09 | 281.66 | 5.04 | 5.04 |
| 58 | 358490.69 | 6288831.35 | 969.69 | 285 | 283.79 | 285.17 | 286.75 | 5.08 | 5.09 |
| 60 | 358498.33 | 6288825.01 | 969.41 | 295 | 293.63 | 295.11 | 296.69 | 4.97 | 4.97 |
| 61 | 358502.10 | 6288821.84 | 969.30 | 300 | 298.52 | 300.03 | 301.62 | 4.93 | 4.93 |
| 64 | 358513.63 | 6288812.32 | 969.59 | 315 | 313.34 | 314.98 | 316.57 | 4.98 | 4.98 |
| 66 | 358521.46 | 6288806.38 | 970.22 | 325 | 323.03 | 324.81 | 326.42 | 4.91 | 4.92 |
| 68 | 358528.41 | 6288799.10 | 970.97 | 335 | 333.09 | 334.87 | 336.50 | 5.03 | 5.04 |
| 68* | 358528.48 | 6288798.95 | 970.99 | 335* | 333.25 | - | - | - | - |
| 70* | 358530.93 | 6288789.55 | 970.87 | 345* | 341.80 | - | - | - | - |
| 70 | 358535.32 | 6288791.92 | 971.40 | 345 | 343.05 | 344.83 | 346.48 | 4.98 | 4.99 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|------------|--------|------|--------|--------|--------|------|------|
| 72* | 358530.61 | 6288779.74 | 970.70 | 355* | 348.87 | - | - | - | - |
| 72 | 358543.51 | 6288784.88 | 970.52 | 355 | 353.80 | 355.63 | 357.32 | 5.40 | 5.42 |
| 74 | 358534.24 | 6288770.09 | 971.86 | 365 | 358.53 | 373.09 | 374.82 | 8.73 | 8.75 |
| 76 | 358541.55 | 6288763.55 | 972.93 | 375 | 368.26 | 382.90 | 384.69 | 4.91 | 4.93 |
| 78 | 358551.27 | 6288761.05 | 973.93 | 385 | 376.57 | 392.94 | 394.78 | 5.02 | 5.04 |
| 80 | 358560.83 | 6288758.22 | 974.89 | 395 | 385.10 | 402.91 | 404.79 | 4.98 | 5.01 |
| 82 | 358570.41 | 6288755.80 | 976.07 | 405 | 393.41 | 412.79 | 414.75 | 4.94 | 4.98 |
| 84 | 358579.99 | 6288753.38 | 977.42 | 415 | 401.80 | 422.67 | 424.72 | 4.94 | 4.99 |
| 86 | 358588.90 | 6288749.18 | 978.95 | 425 | 411.03 | 432.52 | 434.68 | 4.92 | 4.98 |
| 88 | 358597.51 | 6288744.44 | 980.62 | 435 | 420.47 | 442.35 | 444.66 | 4.92 | 4.99 |
| 90 | 358606.70 | 6288741.25 | 981.80 | 445 | 429.25 | 452.08 | 454.46 | 4.86 | 4.90 |
| 92 | 358616.03 | 6288738.02 | 982.91 | 455 | 438.20 | 461.95 | 464.39 | 4.93 | 4.97 |
| 94 | 358625.68 | 6288734.89 | 984.20 | 465 | 447.34 | 472.09 | 474.61 | 5.07 | 5.11 |
| 96 | 358635.20 | 6288732.81 | 985.08 | 475 | 455.74 | 481.84 | 484.40 | 4.88 | 4.90 |

* Posición que no se logró repetir exactamente entre distintos tendidos.

Anexo B

Resistividad aparente y Modelos de Sensibilidad

A continuación se muestran las pseudosecciones de resistividad aparente y modelos de sensibilidad de los perfiles trabajados en esta tesis.

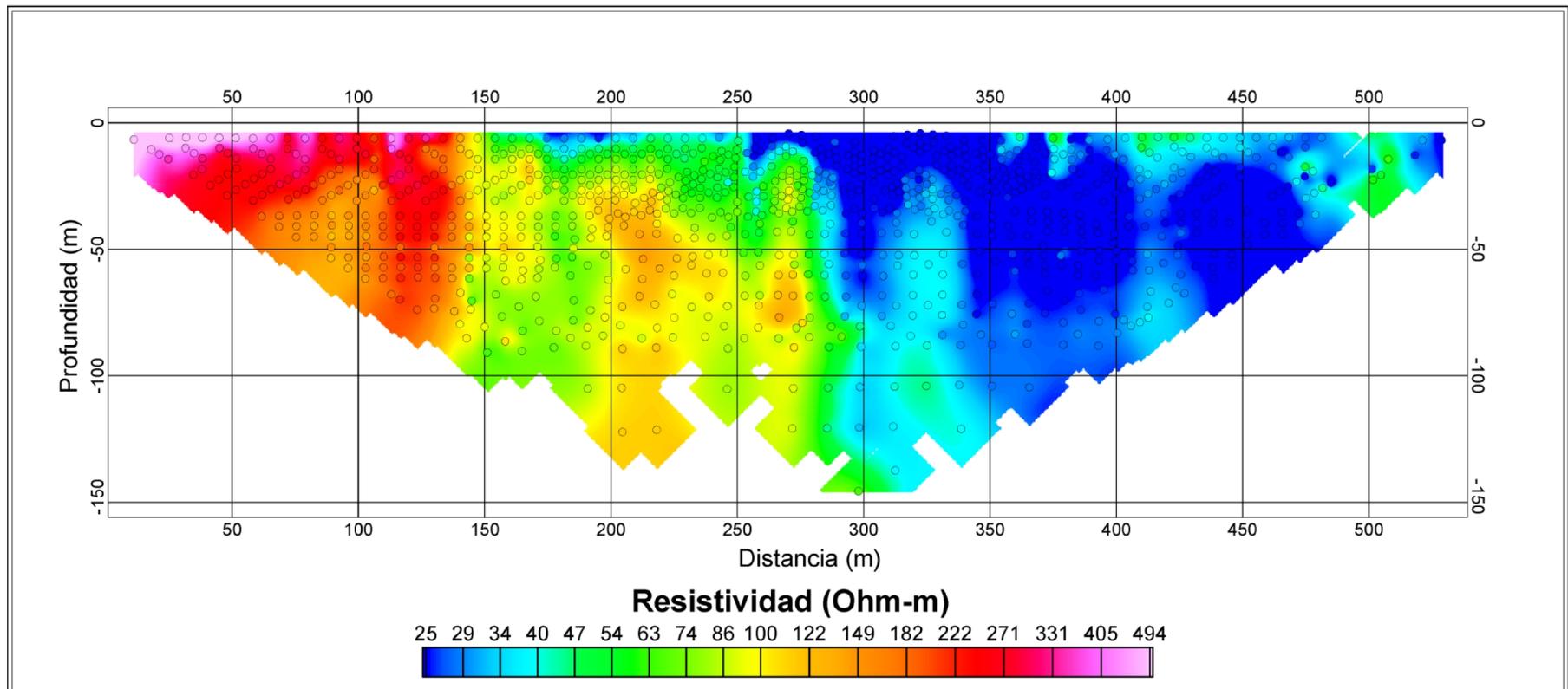


Figura B.1: Pseudosección de resistividad aparente del perfil San Ramón, adquirida utilizando el arreglo geométrico Wenner-Schlumberger. La pseudoprofundidad de los datos es 0,3 veces la separación entre electrodos de corriente. Las posiciones utilizadas corresponden a las posiciones reales en terreno, y la resistividad aparente obtenida fue conservada para el modelamiento 2-D.

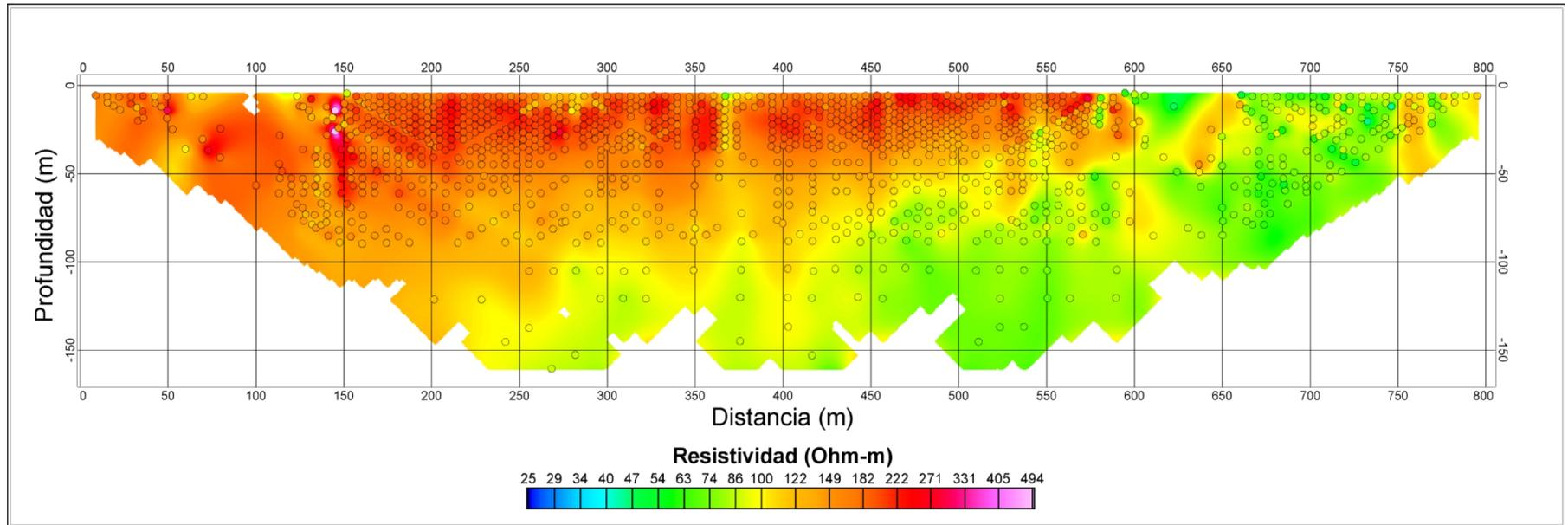


Figura B.2: Pseudosección de resistividad aparente del perfil Quebrada de Macul, adquirida utilizando el arreglo geométrico Wenner-Schlumberger. La pseudoprofundidad de los datos es 0,3 veces la separación entre electrodos de corriente. Las posiciones utilizadas corresponden a las posiciones reales en terreno, y la resistividad aparente obtenida fue conservada para el modelamiento 2-D.

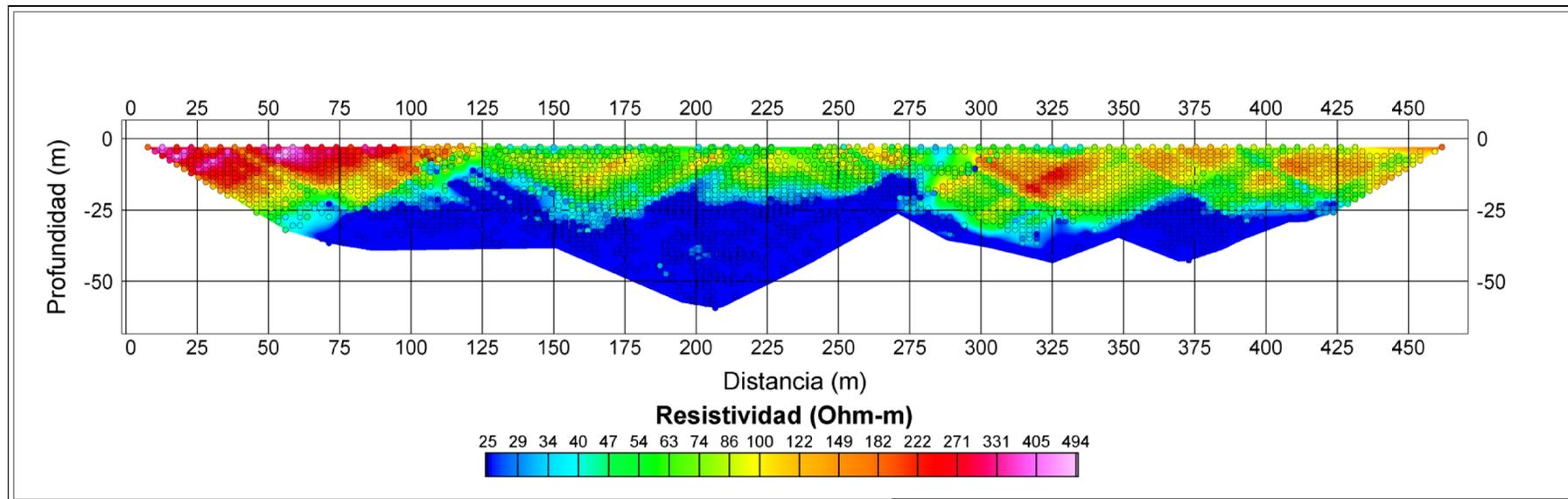


Figura B.3: Pseudosección de resistividad aparente del perfil Escrivá, adquirida utilizando el arreglo geométrico Dipolo-Dipolo. La pseudoprofundidad de los datos es 0,3 veces la separación entre el punto central entre electrodos de corriente y el punto central entre electrodos de potencial. Las posiciones utilizadas corresponden a las posiciones reales en terreno, y la resistividad aparente obtenida fue conservada para el modelamiento 2-D.

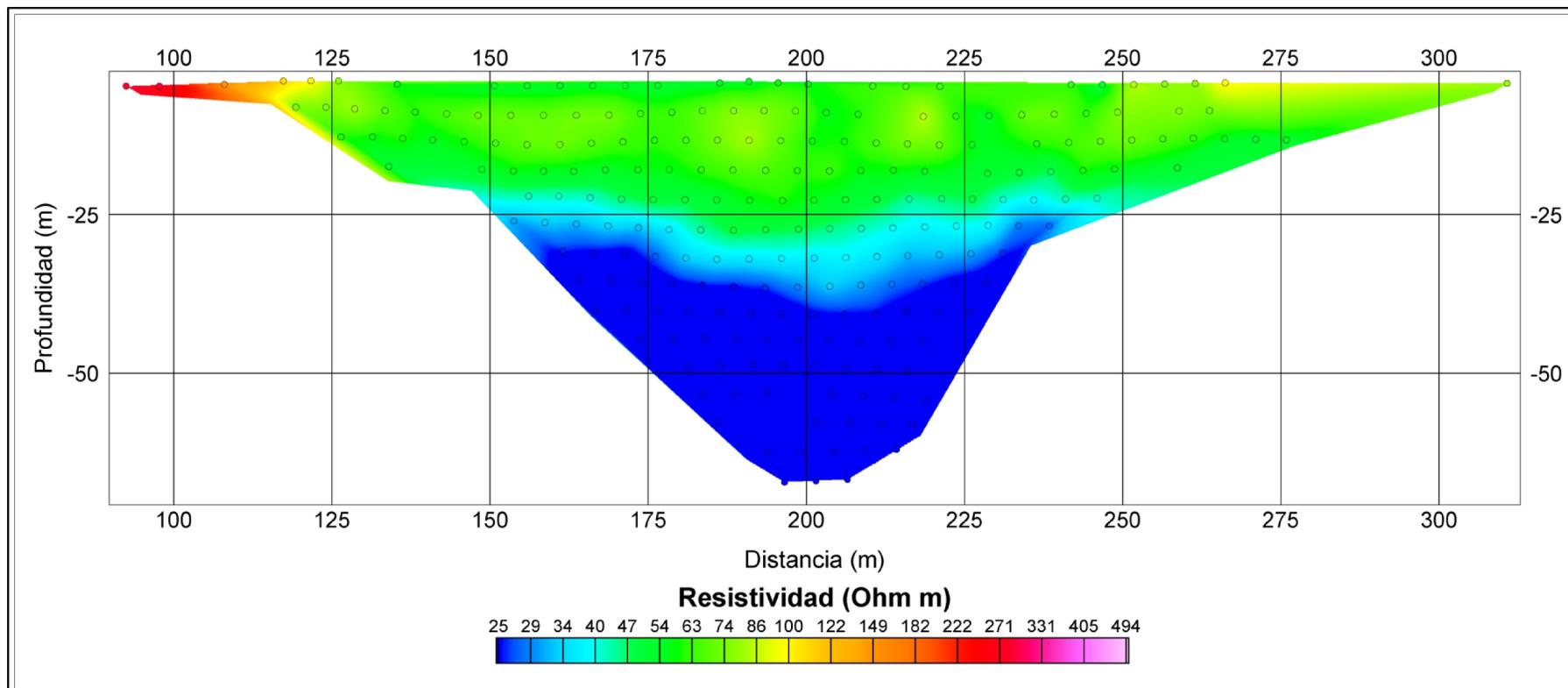


Figura B.4: Pseudosección de resistividad aparente del perfil Escrivá, adquirida utilizando el arreglo geométrico Wenner-Schlumberger. La pseudopropundidad de los datos es 0,3 veces la separación entre electrodos de corriente. Las posiciones utilizadas corresponden a las posiciones reales en terreno, y la resistividad aparente obtenida fue conservada para el modelamiento 2-D.

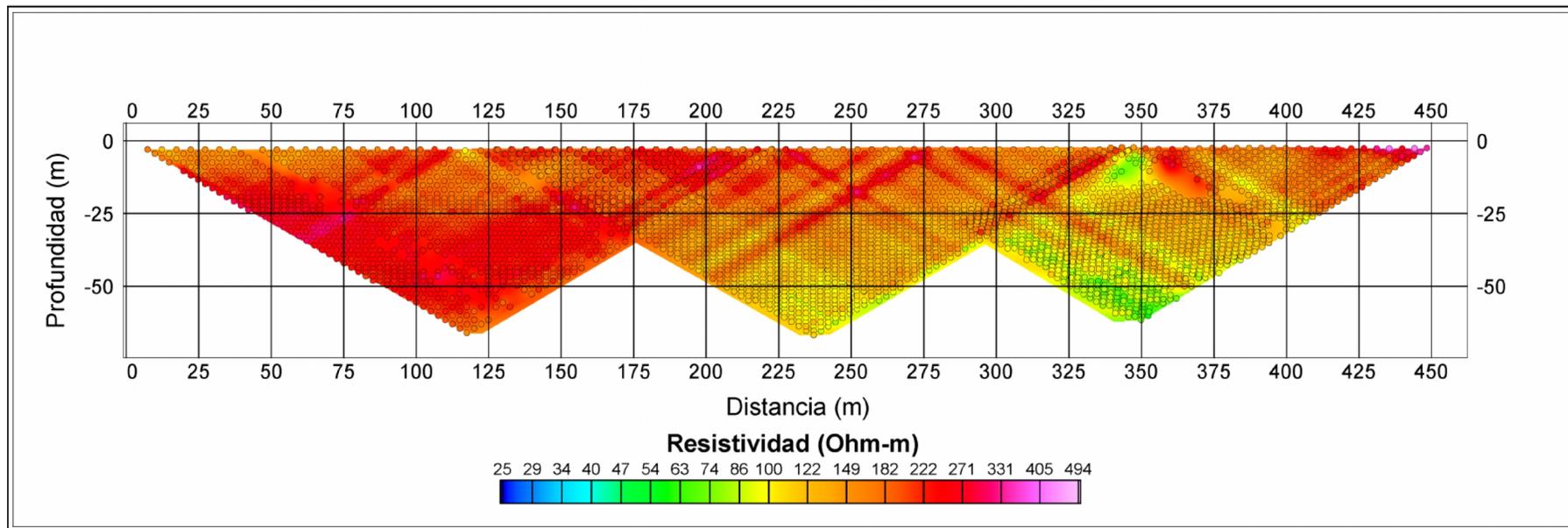


Figura B.5: Pseudosección de resistividad aparente del perfil Panul, adquirida utilizando el arreglo geométrico Dipolo-Dipolo. La pseudoprofundidad de los datos es 0,3 veces la separación entre el punto central entre electrodos de corriente y el punto central entre electrodos de potencial. Las posiciones utilizadas corresponden a las posiciones reales en terreno, y la resistividad aparente obtenida fue conservada para el modelamiento 2-D.

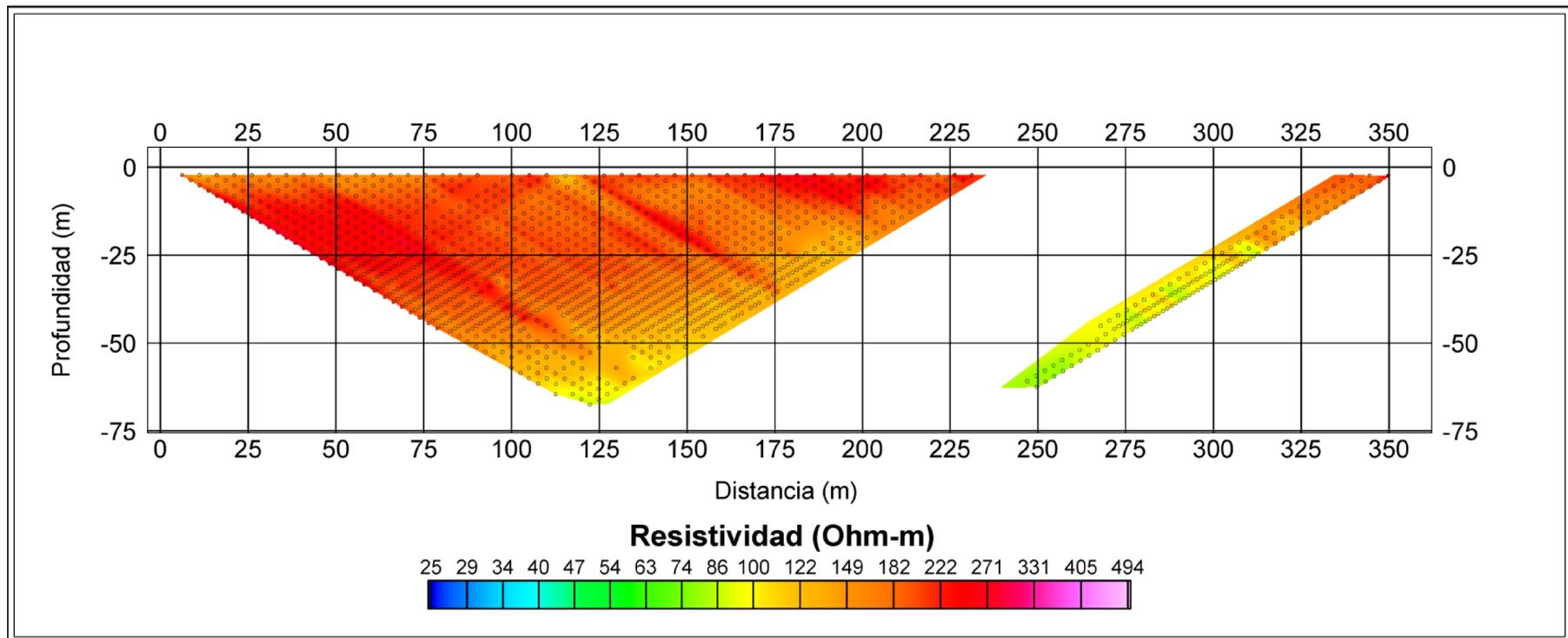


Figura B.6: Pseudosección de resistividad aparente del perfil Panul, adquirida utilizando el arreglo geométrico Polo-Dipolo, con el polo de corriente ubicado a la derecha del dipolo de potencial. La pseudopropundidad de los datos es 0,3 veces la separación entre el electrodo de corriente en la línea y el punto central entre electrodos de potencial. Las posiciones utilizadas corresponden a las posiciones reales en terreno, y la resistividad aparente obtenida fue conservada para el modelamiento 2-D. La interrupción de datos en el costado derecho se debe a la remoción del electrodo en el infinito por parte de desconocidos.

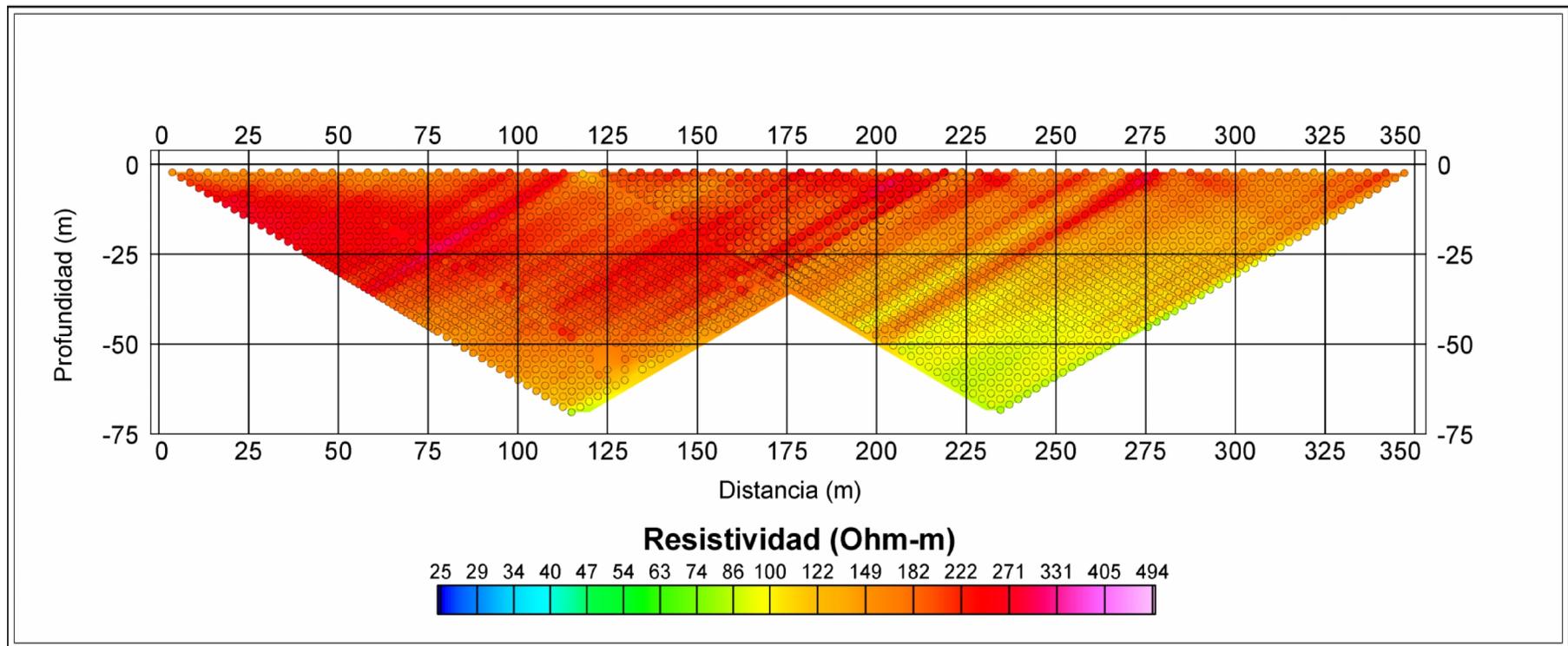


Figura B.7: Pseudosección de resistividad aparente del perfil Panul, adquirida utilizando el arreglo geométrico Polo-Dipolo, con el polo de corriente ubicado a la izquierda del dipolo de potencial. La pseudopropundidad de los datos es 0,3 veces la separación entre el electrodo de corriente en la línea y el punto central entre electrodos de potencial. Las posiciones utilizadas corresponden a las posiciones reales en terreno, y la resistividad aparente obtenida fue conservada para el modelamiento 2-D.

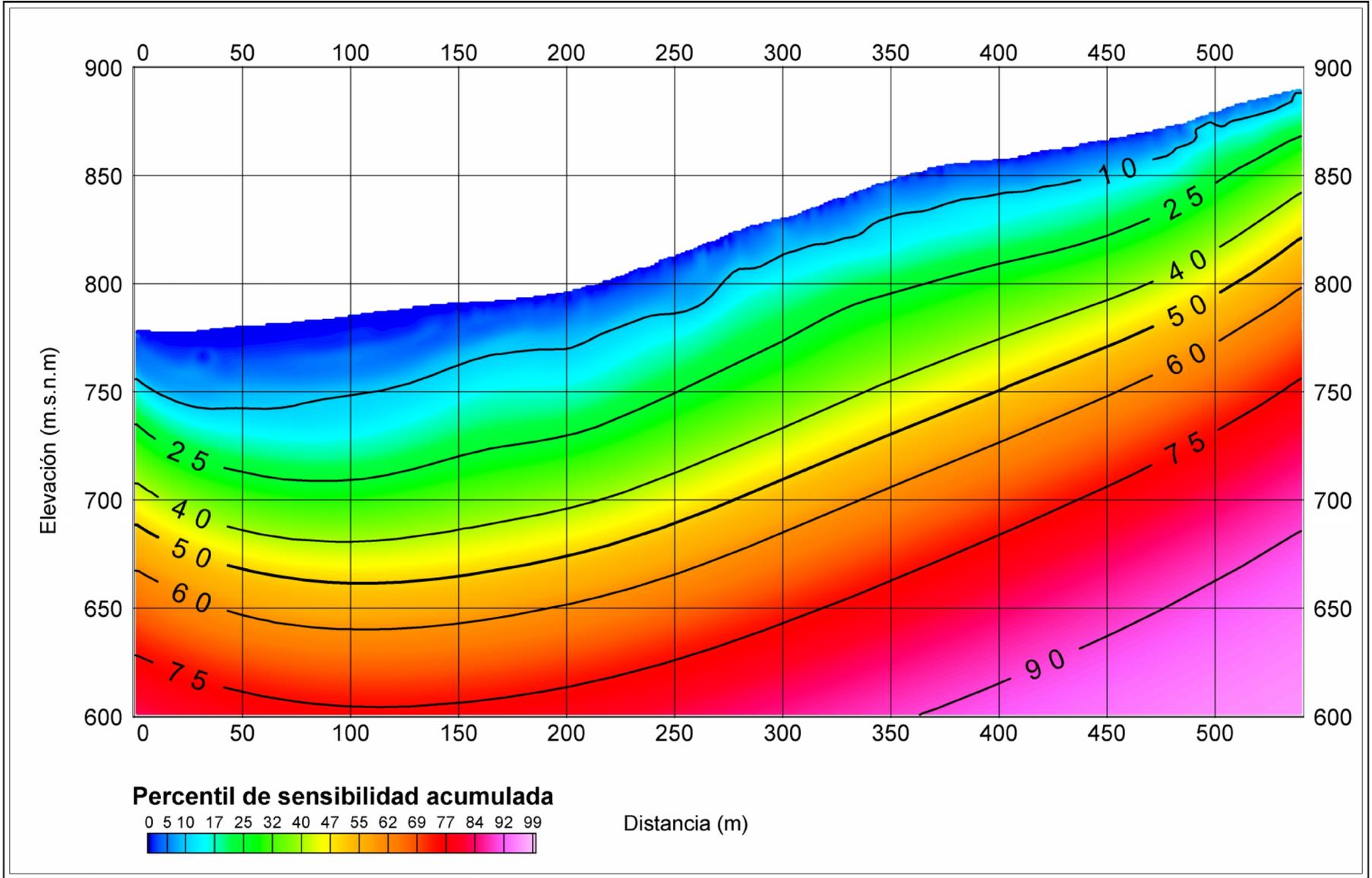


Figura B.8: Modelo de sensibilidad del perfil San Ramón como sensibilidad acumulada. Los contornos indican el percentil de celdas que se encuentra por sobre él.

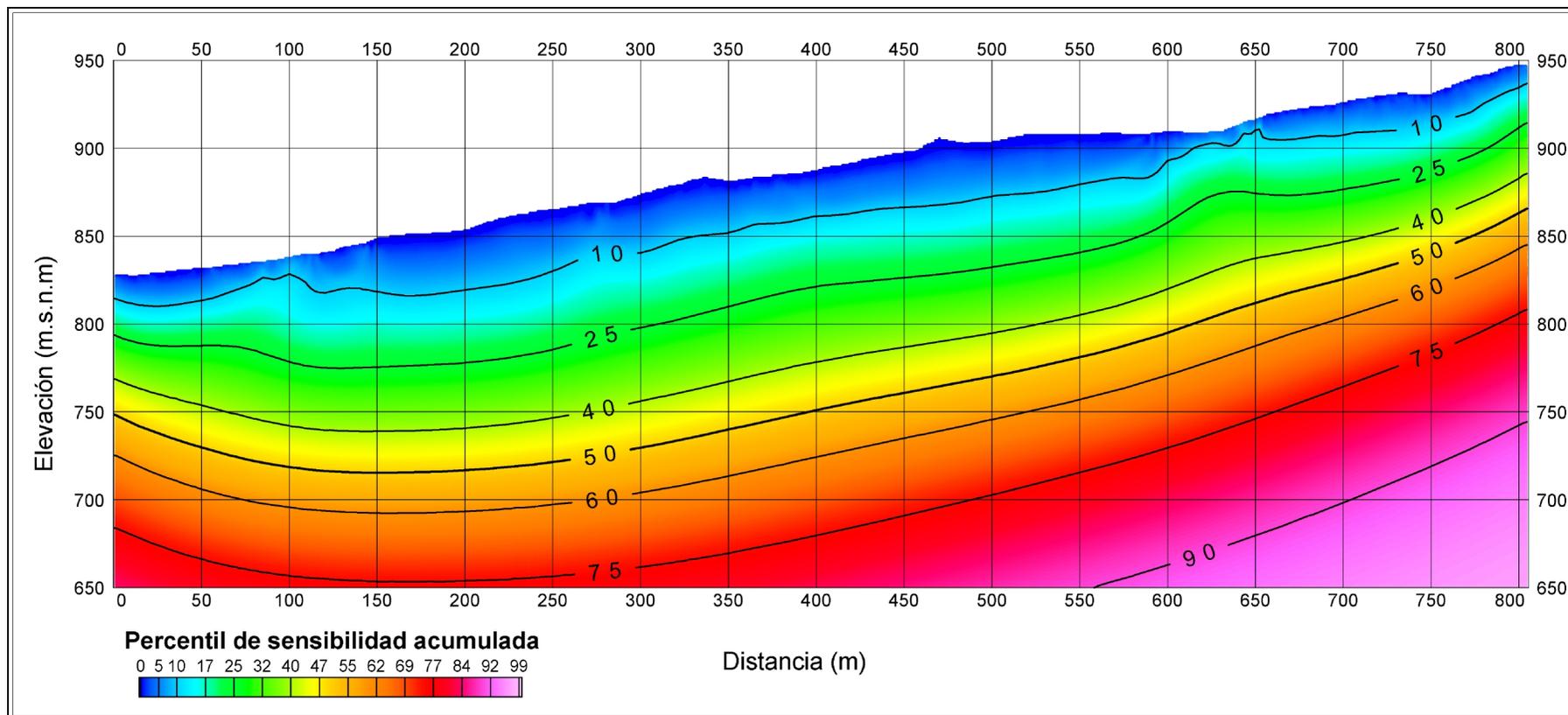


Figura B.9: Modelo de sensibilidad del perfil Quebrada de Macul como sensibilidad acumulada. Los contornos indican el percentil de celdas que se encuentra por sobre él.

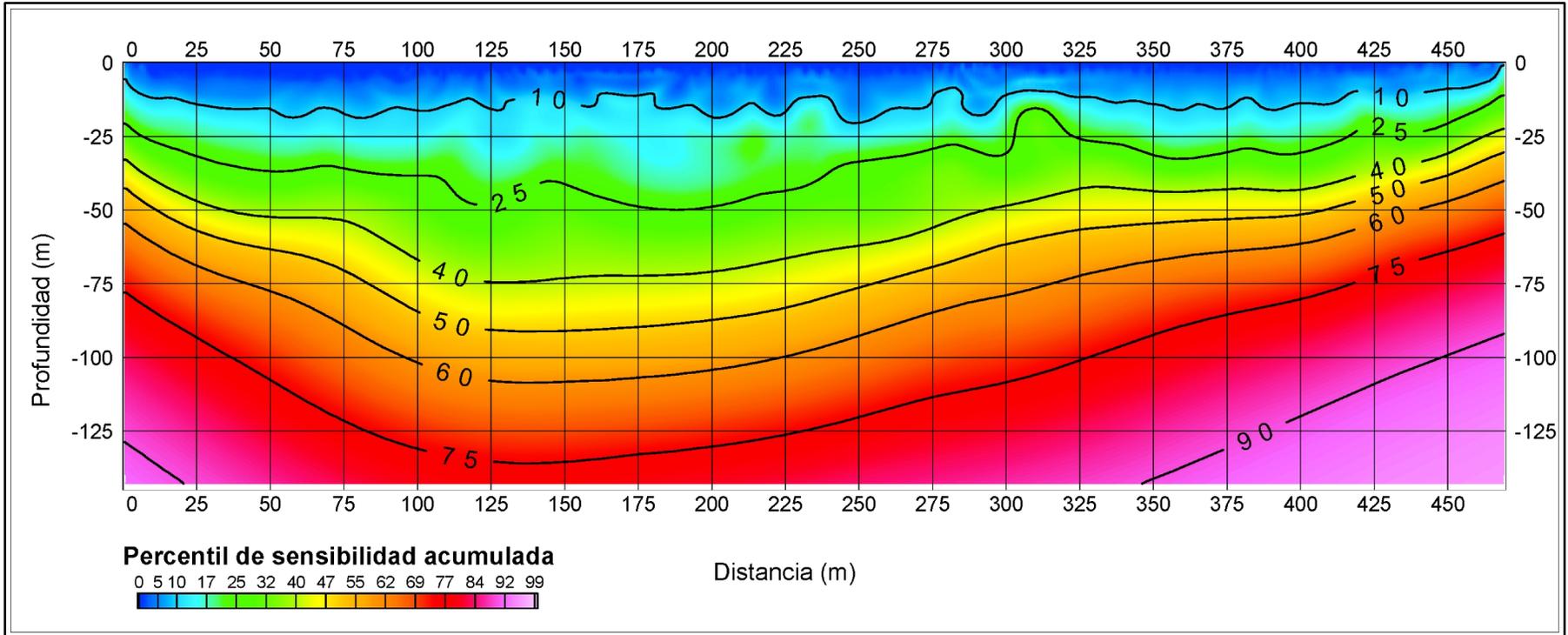


Figura B.10: Modelo de sensibilidad del perfil Escrivá como sensibilidad acumulada. Los contornos indican el percentil de celdas que se encuentra por sobre él.

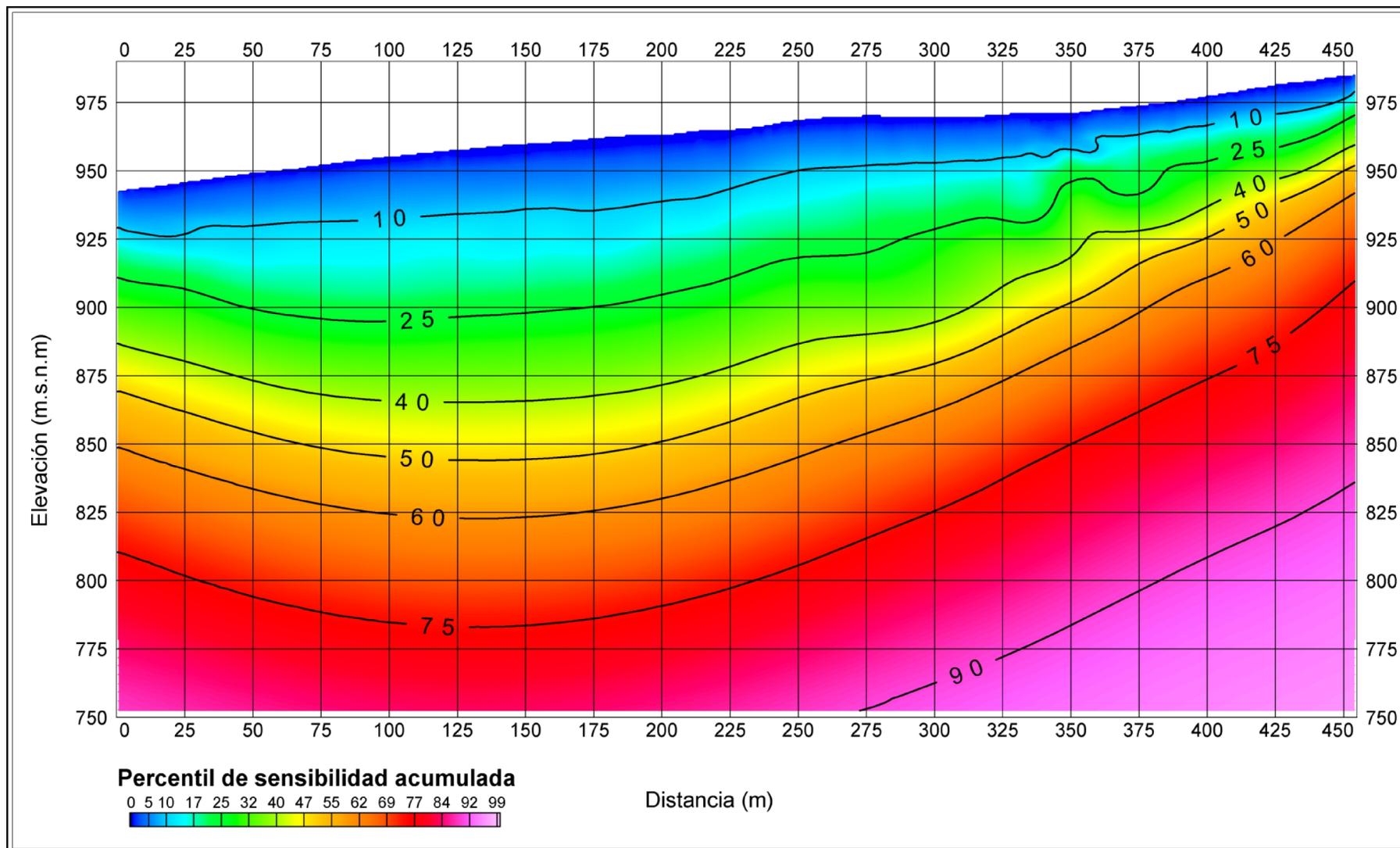


Figura B.11: Modelo de sensibilidad del perfil Panul como sensibilidad acumulada. Los contornos indican el percentil de celdas que se encuentra por sobre él.