

Trabajo Final de grado.  
LICENCIATURA EN GEOLOGÍA - FACULTAD DE CIENCIAS, UdelAR



# DETECCIÓN DE ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS EN EL CUARTEL “PASO DEL REY” SARANDÍ DEL YÍ (DEPARTAMENTO DE DURAZNO)



Estudiante: Anahí Curbelo López  
Docente Tutor: Dra. Leda Sánchez Bettucci  
2019

## Agradecimientos

Esta tesis no sólo permitió abordar dos técnicas nuevas y prometedoras para mí sino también generar vínculos interinstitucionales como con la Dirección Nacional de Minería y Geología a través de Esteban Abelenda y Juan Saltorio, con quienes compartí salidas de campo usando el tomógrafo eléctrico. También, con la Facultad de Ingeniería y el Centro Regional del Norte en Salto donde tanto Alfonso Flaquer como Julián Ramos estuvieron al tanto de esta investigación y a las órdenes para contribuir con el Georadar. Muchas gracias Damián por acompañarme en la salida de campo con este equipo. A la Facultad de Ciencias, DINAMIGE y Ministerio de Defensa Nacional, mi más profundo agradecimiento.

Mencionar a Diego Alejandro González Botero, a quien acudí por dudas respecto al funcionamiento del *Terrameter LS*.

A su vez, los integrantes del cuartel militar Paso del Rey, en particular al Sargento Cotto, a los jefes rotativos y al personal del cuartel en general, a quienes conozco personalmente desde hace tres años yendo periódicamente en las salidas vinculadas al mantenimiento de la estación sísmológica SDYD y siempre fui muy bienvenida.

Por otro lado, más que agradecimiento expreso mi alegría el haber compartido todos estos años con una gran cantidad de compañeros y amigos, aquellos que conozco desde el primer año y aún seguimos a la par: Mica, Nel, Elmo, Pe, Vale, Ana. Saludo *Coprinisphaera!* a mi *geoamicompañera* Agustina Pedro, con quien nos aventuramos a través de grandes campos de sorgo en momentos decisivos de la carrera. A los seres con los que convivo desde hace tres años consecutivos, vivimos grandes momentos y siempre recibí todo su apoyo: Leda Sánchez, Hernán Castro, Damián Dell'Acqua, Martín Rodríguez y Enrique Latorres.

Un abrazo enorme a Flavia, Rafa y Ale compañeros de ruta que siempre estuvieron al tanto de este proceso.

Les mando un abrazo enorme también a mis dos abuelas, dos personas importantísimas que me han enseñado mucho.

Finalmente estoy convencida de que esto no hubiera sido igual de no contar con mi familia y con la enorme fortuna de pertenecer a un país donde el derecho a la educación nos alcanza a todos.

# Contenido

Resumen .....	- 1 -
Introducción.....	- 2 -
(1) Objetivos.....	- 3 -
Objetivos generales .....	- 3 -
Objetivos específicos .....	- 3 -
(2) Localización de la zona de estudio .....	- 4 -
(3) Antecedentes geológicos y geomorfología.....	- 5 -
(3.1) Basamento Cristalino - Paleoproterozoico .....	- 5 -
(3.2) Grupo Durazno –Rocas sedimentarias devónicas .....	- 6 -
(4) Tomografía Eléctrica .....	- 8 -
(4.1) Introducción .....	- 8 -
(4.2) Conducción eléctrica en medios naturales terrestres .....	- 8 -
(4.3) Teoría del método .....	- 9 -
(4.4) Profundidad en Tomografía .....	- 15 -
(5) Georadar ( <i>Ground Penetrating Radar - GPR</i> ).....	- 17 -
(5.1) Introducción.....	- 17 -
(5.2) Comportamiento de las ondas electromagnéticas en el subsuelo .....	- 17 -
(5.3) Profundidad en Georadar.....	- 19 -
(6) Zona de estudio .....	- 21 -
(7) Hipótesis.....	- 22 -
(8) Metodología .....	- 24 -
(8.1) Adquisición de los datos .....	- 24 -
(8.1) Procesamiento de los datos.....	- 26 -
(9) Resultados y Discusión .....	- 28 -
(9.1) Identificación del túnel .....	- 28 -
(9.2) Estudio del subsuelo.....	- 43 -
(9.3) Discusión de los Métodos.....	- 53 -
(10) Conclusiones .....	- 58 -
(11) Bibliografía .....	- 60 -
ANEXO I - El Cuartel .....	- 64 -
ANEXO II – Factor Geométrico .....	- 65 -
ANEXO III - Metodología de adquisición de datos.....	- 67 -
ANEXO IV - Inclusión de datos topográficos a partir de archivos DEM utilizando Qgis. ....	- 74 -

## Resumen

En el año 2000 fue detectado un túnel subterráneo en el cuartel militar “Paso del Rey”, localizado próximo a la ciudad de Sarandí del Yí en el departamento de Durazno (Uruguay). Debido a su estado de derrumbe, al momento de su reconocimiento fue tapiada y enterrada para luego formar parte de la historia popular.

El presente estudio consiste en la aplicación de técnicas geofísicas indirectas tales como Tomografía eléctrica y Georadar para la identificación de la estructura. Las líneas de Tomografía eléctrica fueron de diversas longitudes, generando perfiles con profundidades de hasta 45 m. Para obtener buena resolución a poca profundidad, la distancia entre electrodos fue de entre 30 y 50 cm. Por el contrario, para alcanzar profundidades mayores, la distancia entre electrodos pasó a ser de 2 m. En cuanto al Georadar, las antenas utilizadas fueron de 500 MHz y 900 MHz.

Como resultado, se obtuvieron anomalías sugerentes a la presencia del túnel. A su vez, pueden realizarse muy buenas correlaciones entre las líneas de medida, permitiendo realizar estimaciones de la geología del subsuelo.

**Palabras clave:** Tomografía eléctrica, Georadar, Sarandí del Yí.

## Introducción

El cuartel militar *Paso del Rey* ubicado sobre el kilómetro 210 de la ruta nacional n° 6, en el departamento de Durazno (Uruguay), se creó en 1908 con el propósito de controlar posibles movimientos armados en el interior del país, bajo el mando del Teniente Coronel e Ingeniero Geógrafo José Chiappara. Fue declarado Monumento Histórico Nacional el 13 de diciembre del 2001 por decreto del Poder Ejecutivo.

Desde 1999, a partir de la iniciativa propuesta por el "Equipo de Desarrollo Local", se busca la recuperación, mantenimiento y rescate de los elementos históricos de la ciudad de Sarandí del Yí. En el año 2000, el cuartel *Paso del Rey* estaba siendo objeto de diversas reparaciones cuando se descubrió parte de un túnel subterráneo construido con ladrillos. El mismo, tendría su inicio en el centro del cuartel y se sospecha que podría haber funcionado como túnel de escape, e incluso presentar más de una ramificación. Esta estructura arquitectónica nunca fue desenterrada y hasta hoy permanece como una incógnita entre los habitantes: *¿hasta dónde llega?, ¿hay más de un túnel?, ¿pasa por debajo de mi casa?*

En otro aspecto, no existen trabajos geológicos de detalle en la zona. Las referencias geológicas existentes hasta la fecha, ubican a la ciudad de Sarandí del Yí sobre basamento cristalino de edad Paleoproterozoica; sin embargo, en el área de trabajo se encontró un perfil de por lo menos 3 m de profundidad de arcillas. Cabe destacar, que dentro de un radio de 100 km se han realizado pozos exploratorios que alcanzaron profundidades de hasta 372 m de rocas sedimentarias devónicas, pertenecientes al relleno inicial de la cuenca sedimentaria Paleozoica (*Cuenca Norte*). Por otro lado, a 6 km al Este del área de estudio, se desarrolla la *Zona de Cizalla de Sarandí del Yí* que afecta rocas de basamento Paleoproterozoico.

Se plantea entonces en este trabajo, la aplicación de técnicas de prospección geofísica tales como Tomografía eléctrica y Georadar para la búsqueda y determinación de la estructura arquitectónica mencionada además de establecer la profundidad del basamento.

## (1) Objetivos

### Objetivos generales

Identificación de un túnel subterráneo dentro del cuartel militar *Paso del Rey*.

Determinar la profundidad a la que se encuentra el basamento.

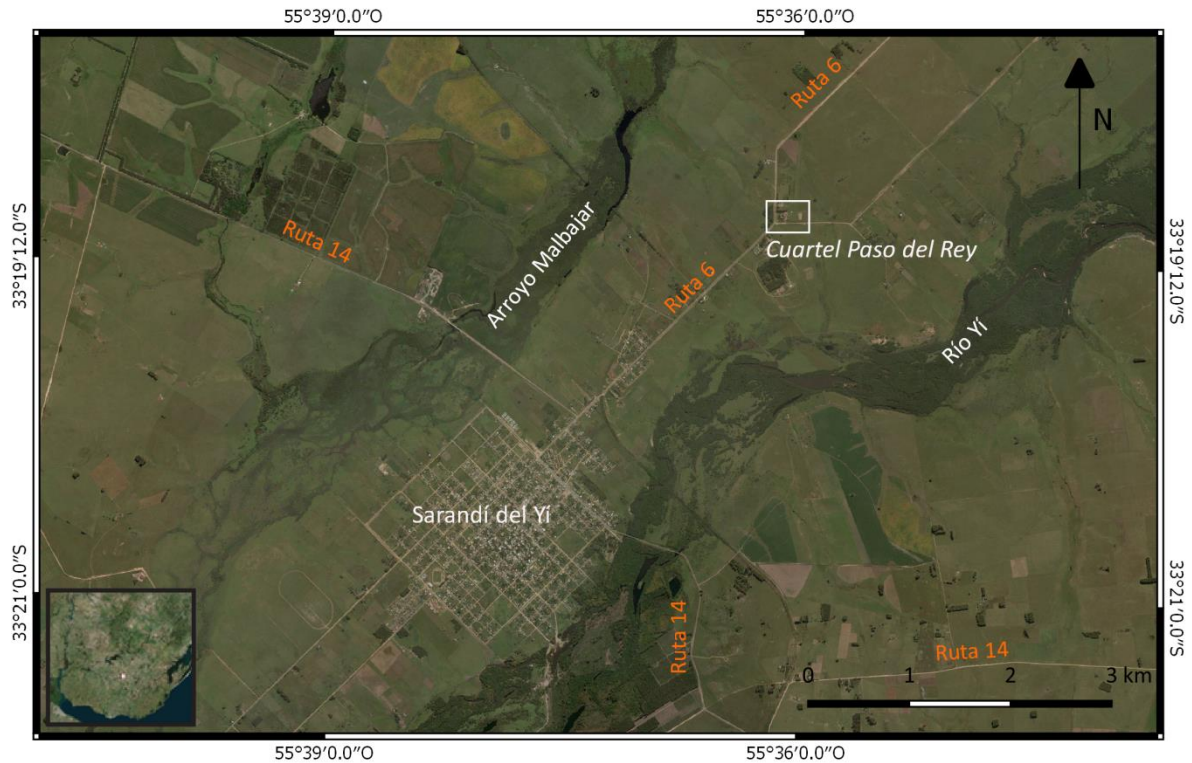
### Objetivos específicos

Para cumplir con los objetivos generales se pretende alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Utilización de los métodos geofísicos indirectos Tomografía eléctrica y Georadar.
- Determinación del alcance de las técnicas geofísicas y evaluación de su potencial aplicado al caso particular.
- Correlación entre los diferentes métodos de prospección.

## (2) Localización de la zona de estudio

El área de estudio comprende parte del predio perteneciente al *Cuartel Paso del Rey* (o *Escuadrón Sarandí del Yí*) que integra la División del Ejército II. Se encuentra en el departamento de Durazno en la frontera con el departamento de Florida a 3 km al Noreste de la ciudad de Sarandí del Yí, en el km 210 de la ruta nacional n° 6 (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa de la región con sistema de referencia WGS 84. Se destaca la localización de la ciudad de Sarandí del Yí y la zona de estudio enmarcada.

### (3) Antecedentes geológicos y geomorfología

La región se caracteriza por un relieve muy suave, con cotas topográficas entre 120 a 130 msnm donde las más bajas se asocian a las laderas de cursos fluviales. Dentro del predio del cuartel, se desarrolla una suave pendiente del terreno hacia el Sur.

A 1,7 km al Sur corre el Río Yí con dirección SO-NE y del lado Norte fluye el Arroyo Malbajar con la misma dirección (Figura 1).

Según Bossi & Navarro (1988) y el mapa geológico del Uruguay (Preciozzi et al. 1985; Loureiro et al. 2017), el predio del Cuartel Paso del Rey estaría sobre el basamento cristalino del Terreno Piedra Alta (Bossi et al. 1993). A 8 km al Este de Sarandí del Yí se desarrolla la Zona de Cizalla Sarandí del Yí (Bossi & Campal 1992).

Rocas devónicas han sido identificadas en afloramientos desde Carmen a Blanquillo y La Paloma asignadas al Grupo Durazno (Bossi 1966). Esta unidad litoestratigráfica representa el primer registro sedimentario fanerozoico en territorio uruguayo. La cartografía de esta región no ha sufrido grandes cambios desde 1975, fecha en la que se cartografió la distribución aflorante de las unidades devónicas a escala 1/1.000.000 (Bossi et al. 1975, Figura 2).

Finalmente, dentro de la campaña de instalación de equipamiento sismológico llevada a cabo por el Observatorio Geofísico del Uruguay (OGU), en el 2015, fue identificado un paquete sedimentario superficial de por lo menos 3 m de arcilla dentro del predio del Cuartel *Paso del Rey*.

#### (3.1) Basamento Cristalino - Paleoproterozoico

Considerando los mapas geológicos de Preciozzi et al. (1985) y Loureiro et al. (2017), el cuartel se ubicaría en una zona con predominancia de rocas ígneas graníticas y metamórficas como gneises, anfibolitas, esquistos, granulitas y migmatitas pertenecientes al basamento del Terreno Piedra Alta (Bossi et al. 1993). Este terreno, con edades concentradas principalmente entre los 2400 y 2000 Ma (Preciozzi et al. 2005), forma parte del Cratón Río de la Plata (Dalla Salda et al. 1988; Oyhantçabal et al. 2007; Rapela et al. 2007; Sánchez



Bettucci et al.2010; Oyhantçabal 2011) y está limitado al Este por la zona de cizalla Sarandí del Yí (ZCSY) (Preciozzi 1979; Bossi & Campal 1992; Oyhantçabal 2011). Esta estructura aflora desde la ciudad de Punta del Este (departamento de Maldonado) con dirección N-NO hasta el departamento de Durazno. Se entiende que de forma similar a la falta de exposición del límite del Cratón del Río de la Plata en Argentina, esta estructura continuaría con dirección NO cubierta por sedimentos fanerozoicos (Rapela et al. 2007).

### (3.2) Grupo Durazno –Rocas sedimentarias devónicas

El Grupo Durazno fue definido por Bossi (1966) y consiste en una secuencia sedimentaria devónica continua depositada durante un ciclo transgresivo-regresivo casi completo separado de las unidades infrayacentes (basamento) y suprayacentes (rocas sedimentarias asignadas al Carbonífero-Pérmico) por discordancias regionales. Afloran al Sur del departamento de Durazno y se desarrollan en el subsuelo en continuidad hacia el Norte del país por algunos pocos cientos de kilómetros (Veroslavsky et al. 2006).

Lambert (1941) caracterizó y cartografió las unidades sedimentarias que en el trabajo de Bossi (1966) elevaron al rango de formación y fueron agrupadas como Grupo Durazno. Así, dentro de esta unidad formal se identifican tres formaciones, que de base a techo se denominan: Cerrezuelo, Cordobés y La Paloma.

La Fm. Cerrezuelo integra areniscas medias a gruesas cuarzo-feldespáticas a feldespáticas, con cuerpos arenoconglomerádicos lenticulares hacia la base y niveles pelíticos intercalados hacia el tope. Estos últimos, pasan en concordancia a un paquete importante de pelitas de tonalidades oscuras, negras, laminadas y masivas intercaladas con finos niveles de areniscas (Fm. Cordobés). En la Fm. Cordobés se destaca la homogeneidad litológica y la presencia de importante contenido fosilífero marino, desarrollo de rosetas de yeso y niveles de arcillas caoliníticas. El final de este ciclo, lo representa la Fm. La Paloma que integra areniscas cuarzo-feldespáticas finas a medias ricas en micas. Es posible distinguir algunos niveles con desarrollo de nódulos ferruginosos y en su porción superior, alternancia con niveles de arena gruesa y conglomerádica (Bossi 1966; Bossi & Navarro 1988; Veroslavsky et al. 2006).

Bossi & Navarro (1988) describen tres pozos realizados en el departamento de Durazno que cortan a las tres unidades devónicas. En la Figura 2 se muestran los perfiles de las perforaciones más cercanas al área de estudio.

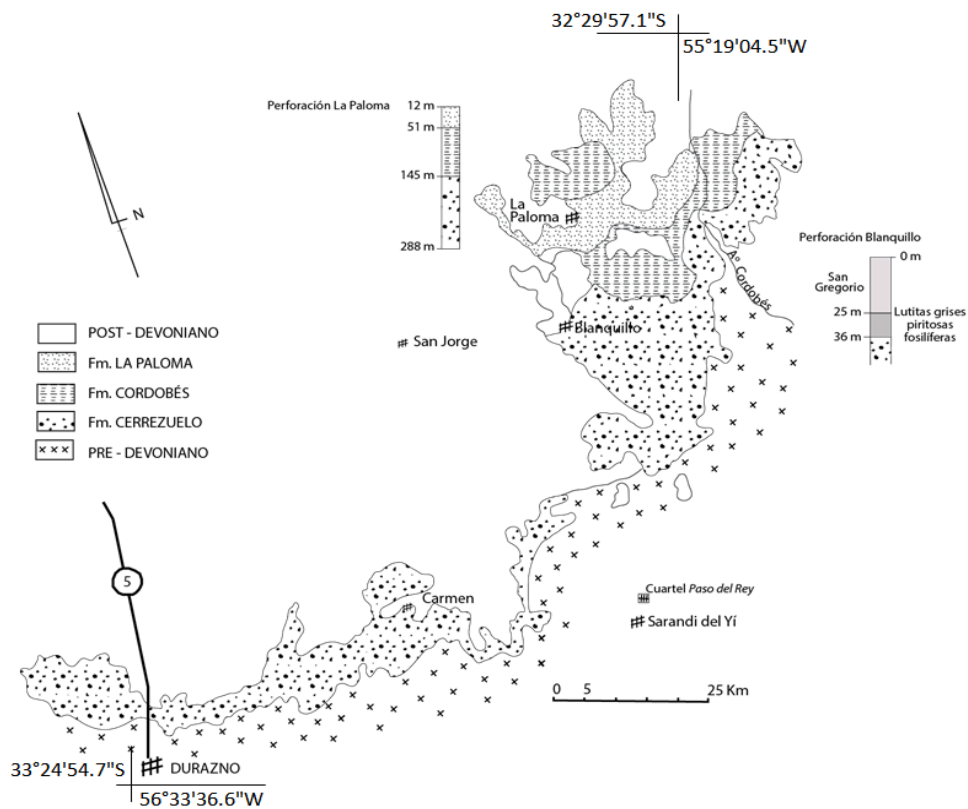


Figura 2. Geología en la región cercana a Sarandí del Yí. Modificado de Bossi et al. (1975).

## (4) Tomografía Eléctrica

### (4.1) Introducción

La Tomografía eléctrica consiste en un método automático de adquisición de datos de resistividad del subsuelo. A partir de un arreglo multielectrónico, que se coloca sobre la superficie, se inyecta corriente y se mide la diferencia de potencial generada. La posición de los electrodos de corriente y potencial varían entre cada medida para obtener datos lateralmente y aumentando en profundidad, y son seleccionados automáticamente según el dispositivo electrónico indicado por el usuario, obteniéndose imágenes 2D o 3D. Este método puede presentar diversas fuentes de ruido tales como contacto defectuoso entre el electrodo y el suelo, polarización de los electrodos, fuentes electromagnéticas como cables de alta tensión en las cercanías, objetos metálicos enterrados y corrientes telúricas (Weinzettel et al. 2009); por lo que es necesario tener conocimiento de estos aspectos previamente a la toma de medidas.

Diversos han sido los trabajos realizados en búsqueda de galerías o cavidades subterráneas (Das et al. 2017; Orlando 2013; Riddle et al. 2010; Martínez López 2010; Martínez López 2007, *Advanced Geosciences Inc.* 2007; Maillol et al. 1999) que ubican a la tomografía eléctrica en una buena posición frente a este estudio.

### (4.2) Conducción eléctrica en medios naturales terrestres

La aplicación de un campo eléctrico a los materiales del suelo y subsuelo activa su capacidad de conducir la electricidad. Los distintos tipos de conductividad se describen a continuación.

#### (4.2.1) Conductividad Electrónica

Conductividad generada debido a que el material presenta un arreglo inter-atómico con electrones pobremente enlazados. Cuando se les aplica un campo eléctrico, estos electrones adquieren una dirección de movimiento común. Es característico de los metales.

#### (4.2.2) Conductividad Dieléctrica

Aplicable a los materiales que no presentan electrones libres (materiales aislantes). En estos casos, cuando se aplica un campo eléctrico (E), ocurre un efecto de polarización donde los

átomos actúan como dipolos eléctricos. Así, los electrones se desplazan en sentido opuesto al campo mientras que los núcleos se mueven levemente en sentido al E. Este efecto es importante bajo campos alternos ya que cambia con la frecuencia del campo y por lo tanto, si varía la polarización, varía la corriente y en consecuencia, varía la conductividad.

#### (4.2.3) Conductividad Electrolítica

Sucede en soluciones acuosas con iones libres. Debido a la capacidad del agua de disociar moléculas, suele estar compuesta de iones con cargas positivas y negativas. Estos iones, son móviles ante un campo eléctrico por lo que se generará una corriente en sentido del campo y otra en sentido opuesto.

Por lo tanto, la conductividad de un material estará ligada a un conjunto de variables permitiendo que un tipo de roca presente, según sus condiciones, un amplio rango de valores de conductividad eléctrica. A modo de ejemplo, el enriquecimiento en minerales arcillosos por meteorización y contenido de agua aumenta la conductividad de un material en comparación con una situación en la que el mismo material se presenta desafectado por procesos superficiales.

#### (4.3) Teoría del método

En un arreglo simple en Tomografía eléctrica, se trabaja con cuatro electrodos: dos de corriente (A y B), a los cuales se les conecta un amperímetro, y dos de potencial (M y N), a los cuales se les conecta un voltímetro (Figura 3a). La batería genera una diferencia de potencial entre A y B, provocando la inyección de una corriente eléctrica a través de A y que llega a B. Teniendo así un circuito cerrado, batería-electrodo-suelo-electrodo-batería, se idealiza que se está trabajando con una porción de material de sección S y largo L al cual se le hace circular corriente y se mide la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) entre las dos caras de dimensión unitaria S ( $V_N - V_M$ ). Es decir, el largo L equivale a la distancia entre los electrodos de potencial (Figura 3c). El cálculo del valor de la resistividad del material de estudio en el punto medio entre dichos electrodos y a cierta profundidad se basa en la Ley de Ohm:

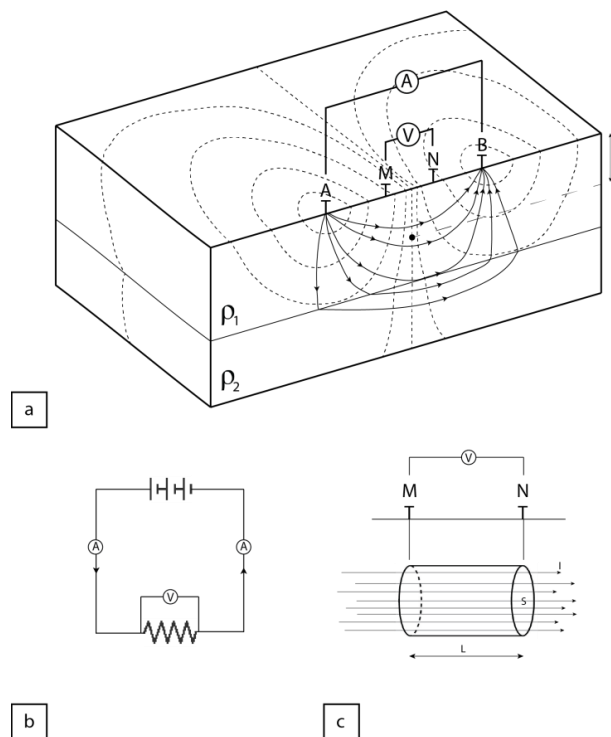
$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{e1})$$

Dicha ley establece que la capacidad de conducir la electricidad (*Resistencia* - R) de un conductor corresponde a la razón entre la diferencia de potencial aplicada entre sus extremos y la corriente que circula a través de él (Figura 3c). Esta ley aplica en la gran mayoría de los casos geofísicos, a menos que se produzcan altas densidades de corriente (J), en cuyo caso la linealidad de la ley puede descomponerse (Reynolds 2011).

Por otro lado, R no es una propiedad de los materiales, sino que dependerá de las dimensiones del conductor. Esta dependencia se establece con una relación de proporcionalidad a través de la constante  $\rho$  (e2) conocida también como *Resistividad eléctrica*, cuya unidad de medida es el Ohmio-metro ( $\Omega\text{m}$ ).

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{e2})$$

$$\frac{V}{L} = \frac{\rho I}{S} \quad (\text{e3})$$



**Figura 3.** Esquemas del funcionamiento de la Tomografía eléctrica. En **a** se muestra un arreglo simple de electrodos (A, B,M,N) conectados a un voltímetro (A) y un amperímetro (V) sobre un suelo conformado por dos capas horizontales de resistividades  $\rho_1$  y  $\rho_2$  ( $\rho_1 > \rho_2$ ). En líneas discontinuas se representan las líneas equipotenciales del campo eléctrico mientras que las líneas continuas representan la corriente eléctrica inyectada. En **b** se esquematiza un circuito equivalente al creado entre el suelo y el resistímetro a una profundidad z. En **c**, la modelización del material de estudio y los parámetros involucrados en el cálculo de la resistividad aparente (ver texto).

En tomografía eléctrica, es común encontrar expresada la relación **e2** involucrando una constante denominada *factor geométrico*  $k$  (expresión **e4**, ver Anexo II).  $k$  incluye información respecto a la geometría de la distribución de la corriente en el subsuelo (comportamiento del campo eléctrico similar a aquél producido por una carga puntual; Figura 3a) y el dispositivo electródico utilizado por el usuario en la investigación (ver sección siguiente, Anexo II). Los cálculos de  $k$  para los diferentes dispositivos electródicos pueden encontrarse en tablas estandarizadas (Loke 1999).

$$\rho = \frac{kV}{I} \quad (\mathbf{e4})$$

#### (4.3.1) Resistividad aparente

El tomógrafo eléctrico mide y realiza los cálculos para obtener valores de resistividad. Es importante considerar que esos cálculos son realizados entendiendo al subsuelo en condiciones ideales; esto es, un subespacio homogéneo e isótropo. Sin embargo, en la naturaleza, la realidad es más compleja.

Inicialmente se asume, sea cual sea la estructura verdadera del subsuelo, que para cada medida, se está trabajando sobre condiciones ideales. Es por esto que el valor de resistividad obtenido es en realidad una *Resistividad aparente* ( $\rho_a$ ). El valor de  $\rho_a$  se aproxima a  $\rho$  cuanto más corriente fluya por el material medido y cuanto menos fluya por materiales adyacentes, permitiendo mayor resolución a menor profundidad.

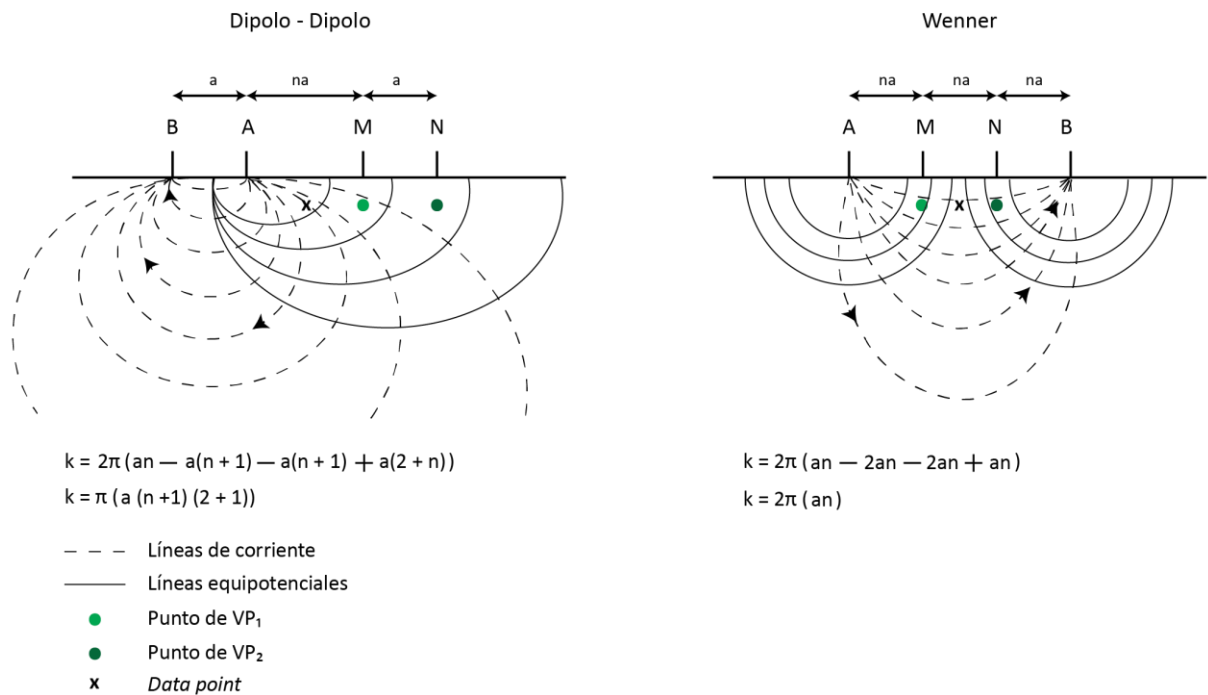
La diferencia de potencial medida entre los electrodos M y N es en superficie. Cuando las líneas de corriente pasan de un medio a otro con diferente resistividad, la geometría de las superficies equipotenciales se deforma (Figura 3a). Esta deformación provoca cambios en la diferencia de potencial medida respecto a un caso de subsuelo homogéneo. Durante la adquisición de datos, a esta medida de diferencia de potencial se le asigna una ubicación horizontal que corresponde al punto medio del arreglo de cuatro electrodos y un valor de profundidad siguiendo algún criterio (Roy & Apparao 1971; Edwards 1979; Figura 4).

Un factor muy importante que influye en el valor de resistividad calculado es el dispositivo electródico (Figura 4):

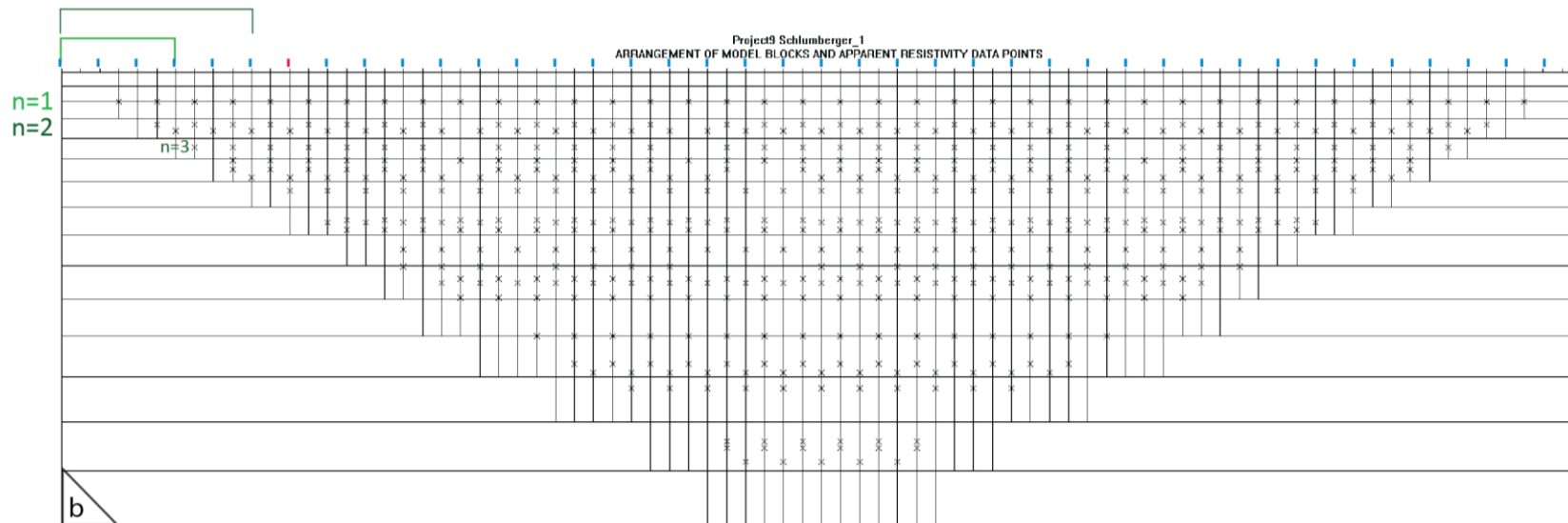
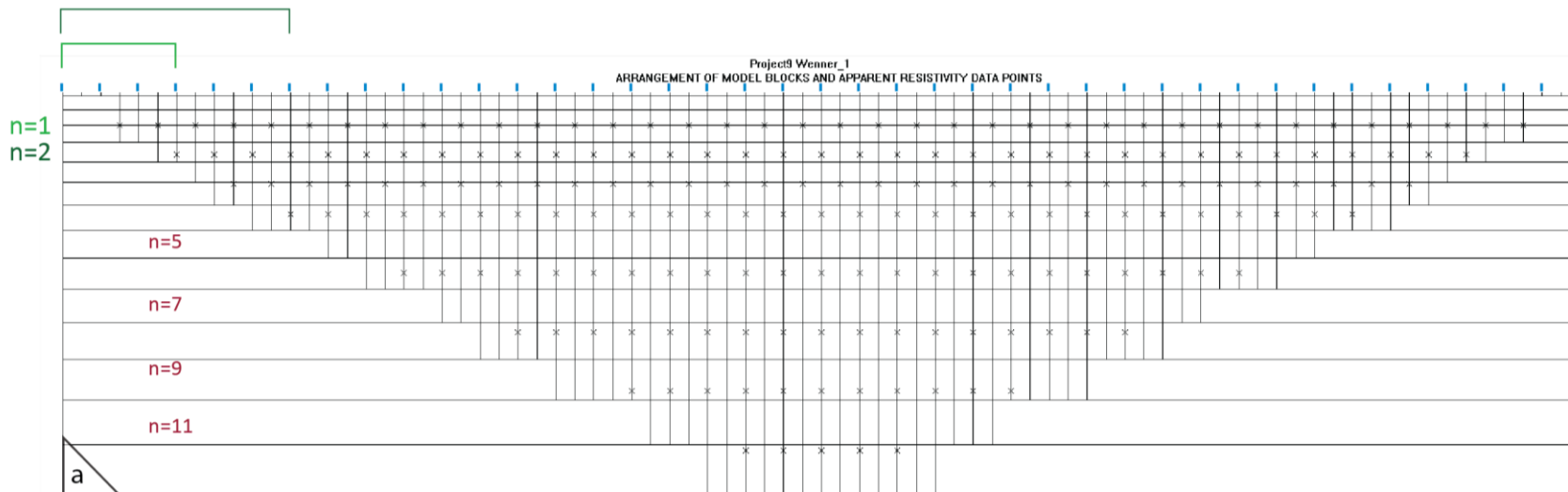
- Wenner  $\alpha$
- Schlumberger
- Dipolo-dipolo
- Polo-Polo
- Polo-Dipolo

La diferencia metodológica entre estos dispositivos radica en la ubicación espacial de los electrodos de corriente y potencial al momento de la medición. Por ejemplo, en el caso del dispositivo Wenner los electrodos de corriente se encuentran en los extremos de un arreglo de cuatro electrodos, mientras que los electrodos potenciales en el centro. La distancia entre ellos es la misma ( $AM=MN=NB$ ) (Figura 4). Por el contrario, en el dispositivo Dipolo-Dipolo los electrodos A y B se encuentran juntos en un extremo del arreglo y los electrodos M y N en el otro extremo. Aquí, la distancia entre los electrodos es  $AB=MN=a$  y  $AM=na$  donde  $n$  es un número natural (Figura 4).

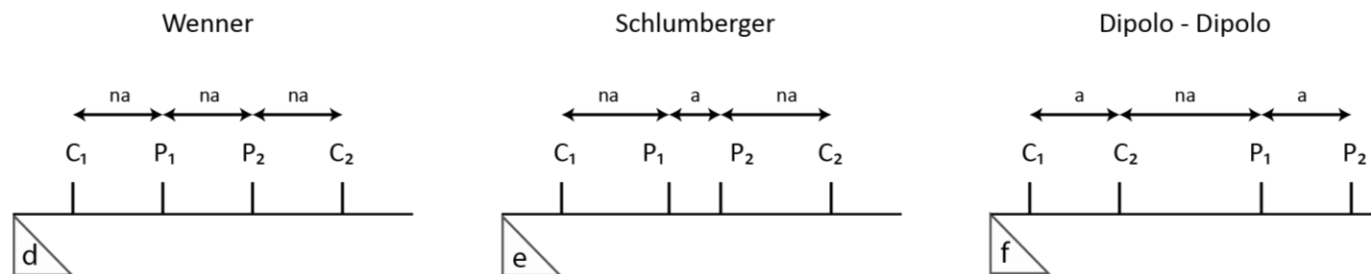
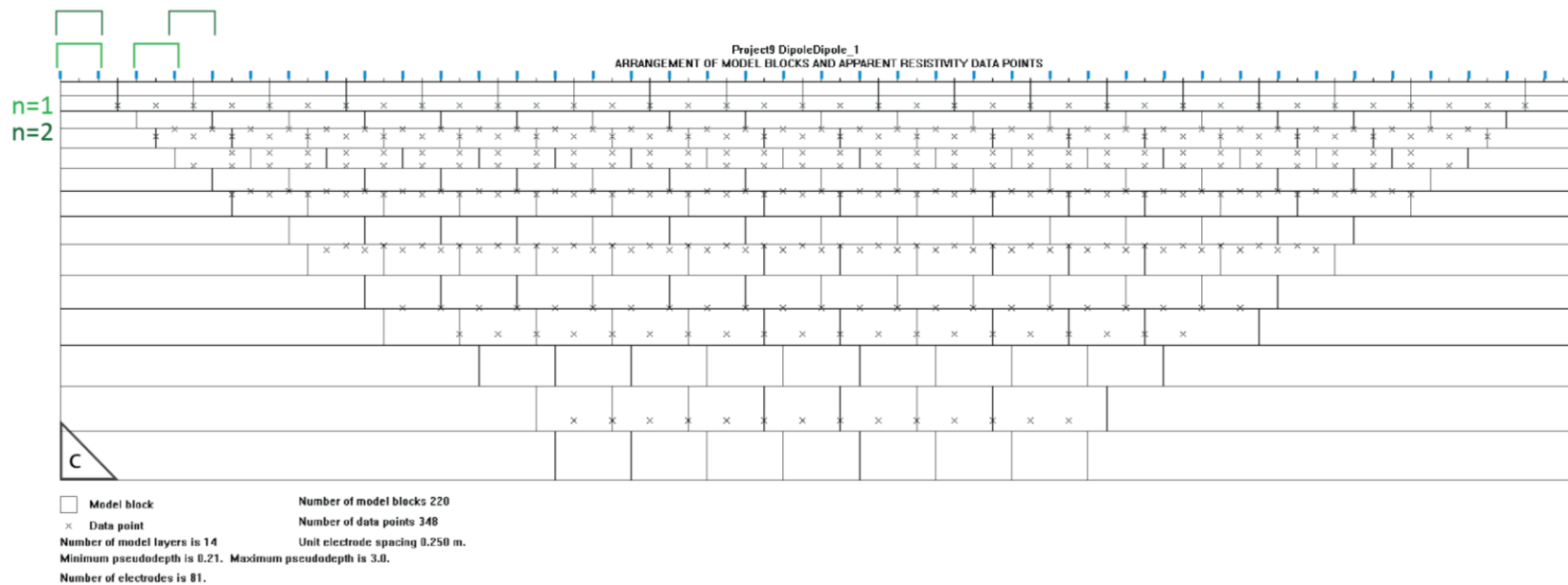
Lo mencionado anteriormente genera diferencias en el comportamiento del campo eléctrico, la distribución de la corriente inducida y la cantidad de puntos de medida (Figura 5). Todo esto influirá en el modelo final obtenido.



**Figura 4.** Distribución del flujo de corriente y líneas equipotenciales para un arreglo de cuatro electrodos según el método Dipolo-Dipolo y Wenner. Se muestra a su vez la expresión del factor geométrico correspondiente.







**Figura 5.** Esquema de la localización de los puntos de medida en perfiles 2D<sup>1</sup> para los arreglos Wenner –  $\alpha$  (a), Schlumberger (b) y Dipolo-Dipolo (c). “n” adopta valores de números naturales. d, e, f. Configuración de los electrodos de corriente (C) y potencial (P) para cada método en relación a n.

<sup>1</sup> Esquema obtenido mediante el *software* RES2DINV.

La localización de todas las medidas, considerando su posición horizontal y su posición en profundidad, da lugar a un perfil de resistividades y profundidades aparentes que se conoce como *pseudosección*.

La conversión de resistividad aparente a real implica un método de inversión bastante complejo a través de *software* diseñado para estos estudios, donde los datos se someten a procesos iterativos, a través de los cuales, se ajustan a un modelo teórico.

#### (4.4) Profundidad en Tomografía

La profundidad de investigación se define según Evjen (1938) como aquella a la cual una fina capa de suelo paralela a la superficie contribuye la mayor cantidad a la señal total medida en la superficie. Según Roy & Apparao (1971) esta profundidad depende de la posición de los electrodos de corriente y potencial, y no solamente por la penetración y distribución de la corriente. Esto es porque la diferencia de potencial medida por un par dado de electrodos potenciales en superficie resulta de la contribución de todas las capas horizontales del subsuelo al paso de corriente eléctrica. Cuando se desciende en profundidad, esa contribución es variable y dentro de esa variabilidad, existe un máximo de contribución.

Loke (1999, 2003) sugiere que Dipolo – Dipolo en general presenta menores profundidades de investigación comparado con Wenner. En primera instancia, puede interpretarse que con Wenner se obtendrán datos de resistividad a mayor profundidad. Sin embargo, hay que tener cuidado cuando se habla de profundidad de investigación.

Edward (1977)<sup>2</sup> modifica el concepto de la profundidad efectiva de investigación de Roy & Apparao (1971) por la profundidad media de investigación, en la cual se considera aquella a la cual se tiene un máximo de contribución cuando la mitad de la señal proviene de arriba y la otra mitad de abajo. Ni la profundidad efectiva de investigación, ni la profundidad media de investigación representan la profundidad máxima alcanzada en una tomografía, sino la profundidad que se le asignará a un valor de diferencia de potencial medido por un par de electrodos potenciales durante la adquisición de datos.

---

<sup>2</sup>El software de inversión utilizado, RES2DINV, utiliza este criterio para el cálculo de profundidades en las pseudosecciones de resistividad aparente.

Por otro lado, la profundidad de investigación no es la *real* ya que su cálculo se basa en asumir un medio homogéneo. Las profundidades *reales* son las que se obtienen mediante los métodos de inversión (Loke & Beker 1996) y son éstas, las que figuran en los resultados finales de la tomografía junto con las *resistividades reales*.

En este estudio, las tomografías eléctricas fueron realizadas con el equipo *ABEM Terrameter LS* (Figura 6) de la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE). Tiene incorporado un *set* de electrodos, consola de comando, batería 12V, *set* de conectores y cuatro cables de corriente de 200 m cada uno enrollados en carretes con un peso individual (por carrete) de 24 kg. El *set* de cuatro cables permite armar perfiles utilizando uno o dos pares de rollos de cables de corriente (ABEM, A. 2012) por lo que se pueden generar líneas de hasta 800 m de largo y alcanzar 153 m de profundidad<sup>3</sup>. Los dispositivos electrónicos que tiene incorporado, son *Wenner  $\alpha$* , *Schlumberger*, *Dipolo-Dipolo*, *Polo-Dipolo*, *Polo-Polo* (para tomografía 2D) y *Gradient* (para tomografía 2D y 3D), además de la configuración para realizar estudios de Polaridad Inducida (PI). Presenta una capacidad de memoria de 4Gb.



**Figura 6.** Imagen del equipo básico del *Terrameter LS* (ABEM, A., 2012) con los rodetes de cables de corriente al fondo, la consola de comando al frente, los electrodos a la izquierda y los conectores a la derecha.

---

<sup>3</sup> Dato tomado de "Especificaciones técnicas" - ABEM Cables de imagen de resistividad.

## (5) Georadar (*Ground Penetrating Radar - GPR*).

Esta técnica fue aplicada principalmente para contar con una segunda técnica geofísica, que funciona con principios físicos diferentes, para complementar los resultados de las tomografías eléctricas realizadas. A falta de datos directos, esto resulta de relevancia a la hora de validar los resultados obtenidos.

### (5.1) Introducción.

El Georadar utiliza campos electromagnéticos para detectar variaciones en las propiedades de los materiales. A través de una antena emisora transmite pulsos electromagnéticos al subsuelo para un rango de frecuencias definido. Cada antena tiene un rango de frecuencias de operación (*bandwidth*) donde el máximo de poder ocurre a una frecuencia central ( $f_c$ ). Debido a que la propagación de las ondas se encuentra condicionada por las propiedades electromagnéticas del medio por el que viajan, a lo largo de su trayecto sufren ciertos efectos que pueden permitir inferir la naturaleza de los materiales presentes. Ejemplos de estos efectos son: reflexión, refracción, atenuación, polarización. La reflexión cumple un rol fundamental en la detección de las diferentes estructuras, ya que es lo que permite que la señal emitida pueda ser recibida por una antena receptora. Así, el Georadar genera información del tiempo de viaje de la onda desde la antena emisora hasta volver a superficie luego de ser reflejada en alguna discontinuidad.

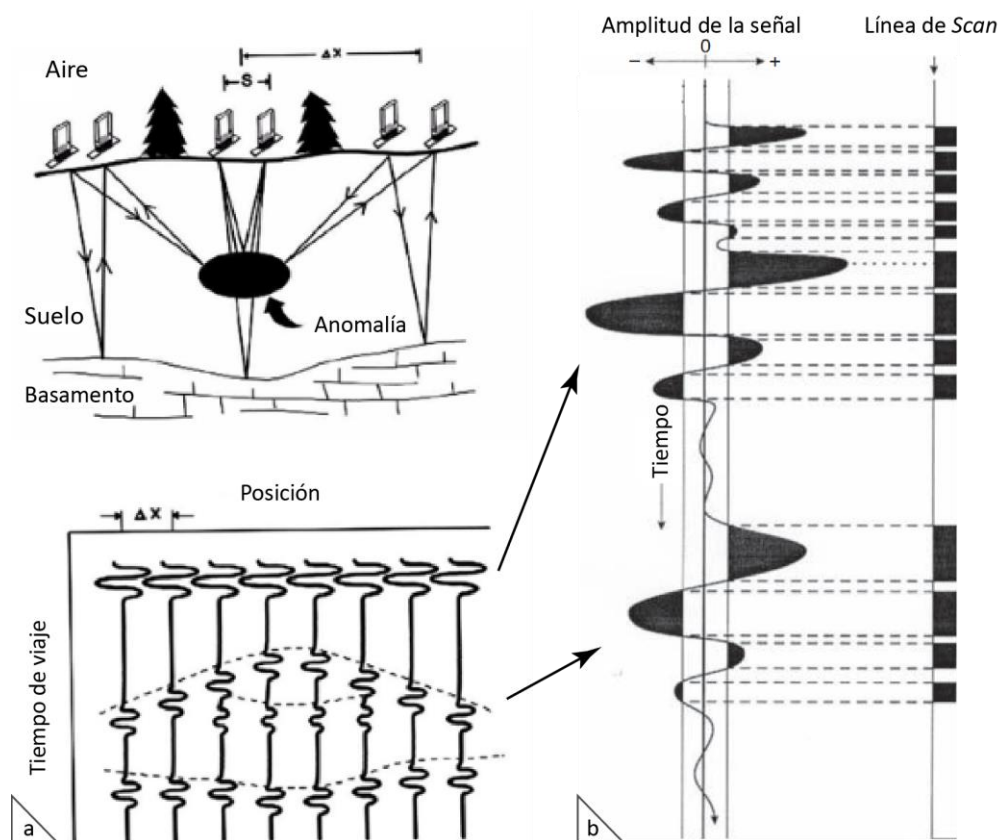
El producto final es un perfil compuesto por una gran cantidad de medidas de tiempo para cada pulso emitido (Figura 7). El eje horizontal es equivalente a la longitud de la línea de medida (m, cm, km) y en el eje vertical, se representa una escala de tiempo (ns) o profundidad (m).

### (5.2) Comportamiento de las ondas electromagnéticas en el subsuelo

Considerando que el tiempo de viaje del pulso electromagnético emitido es de gran relevancia en este análisis, la velocidad de propagación de las ondas también lo es. La velocidad está controlada principalmente por la *constante dieléctrica* y la conductividad del subsuelo.

La *permitividad dieléctrica* es una propiedad de los materiales, que se expresa como una función compleja, compuesta por su parte real (*constante dieléctrica*) y su parte imaginaria (*pérdida dieléctrica*), lo cual describe la capacidad de almacenar y disipar energía respectivamente. La constante dieléctrica, generalmente decrece con el incremento de la frecuencia, contrariamente a la conductividad y la pérdida dieléctrica<sup>4</sup> ("*dielectric loss*" o "*loss factor*"). La pérdida dieléctrica es despreciable si la conductividad del material es menor a 10 mS/m ( $>100 \Omega/m$ ) (Martínez & Brynes 2001).

Los contrastes de la constante dieléctrica entre materiales adyacentes se traducen en un contraste de velocidades, permitiendo la reflexión de las ondas electromagnéticas nuevamente a superficie (Figura 7). Cuando mayor sea el contraste, menor cantidad de señal se verá refractada; por lo tanto, la señal recibida se verá con mayor intensidad.



**Figura 7.** Ilustración del funcionamiento básico del Georadar durante la adquisición de las ondas reflejadas generando una hipérbola sobre el cuerpo reflector ilustrado (a) y graficado en series de tiempo (b) *radargrama*. Tomado y modificado de Annan (2004) y Reynolds (2011) respectivamente.

<sup>4</sup> Dependiendo de la frecuencia, la capacidad de las moléculas de alinearse al campo alternante de la onda electromagnética.

Por otro lado, la atenuación de la señal es otro proceso que disminuye la posibilidad de identificar estructuras subsuperficiales. Puede deberse a diversas causas:

- Durante el proceso de reflexión/refracción
- Absorción (transformación de energía electromagnética en calor)
- Esparcimiento geométrico de la energía (transmisión de los pulsos dentro de un cono de ángulo 90° provocando una reducción de la energía por unidad de área a una distancia de  $\frac{1}{r^2}$ ).
- Presencia de agua (conductividad del suelo).

### (5.3) Profundidad en Georadar

La profundidad máxima alcanzada por el georadar se encuentra determinada por aquella desde la cual se detectan reflexiones. Para un mismo subsuelo, antenas que emiten ondas de baja frecuencia tienden a penetrar menores profundidades debido a que a mayor frecuencia, las ondas se atenúan más (Robinson et al. 2013). A su vez, para una misma antena, sobre diferentes subsuelos, donde los materiales presentan diferentes valores de permitividad, la profundidad alcanzada será diferente. Por este motivo, conocer con la mayor precisión posible el valor de la permitividad en el subsuelo es importante para determinar la profundidad de una anomalía. Existen diferentes métodos para estimar este parámetro, entre los que se destaca el enterramiento de un objeto conocido a una profundidad conocida y estudiar su respuesta con el Georadar. Otra forma de estudio implica contar con antenas emisora y receptora separadas, donde la metodología consiste en realizar múltiples medidas en un mismo lugar, considerando un mismo reflector desconocido, al tiempo que por cada medida se aumenta la distancia entre las antenas. Lo que se obtiene son curvas de velocidad (distancia en función de tiempo) y conociendo este parámetro se realiza una estimación más aproximada de la permitividad.

En este estudio, los radargramas fueron obtenidos utilizando el GPR de Radar Systems Inc. "Zond - 12e" con antenas blindadas de la misma compañía de frecuencias centrales de 500 MHz y 900 MHz (Figura 8). Estos equipos son gestionados por la Facultad de Ingeniería (UdelaR). El equipo necesita una fuente de energía de 12 V y una computadora con sistema operativo Windows para funcionar como consola de comando teniendo instalado el software compatible Prism2.

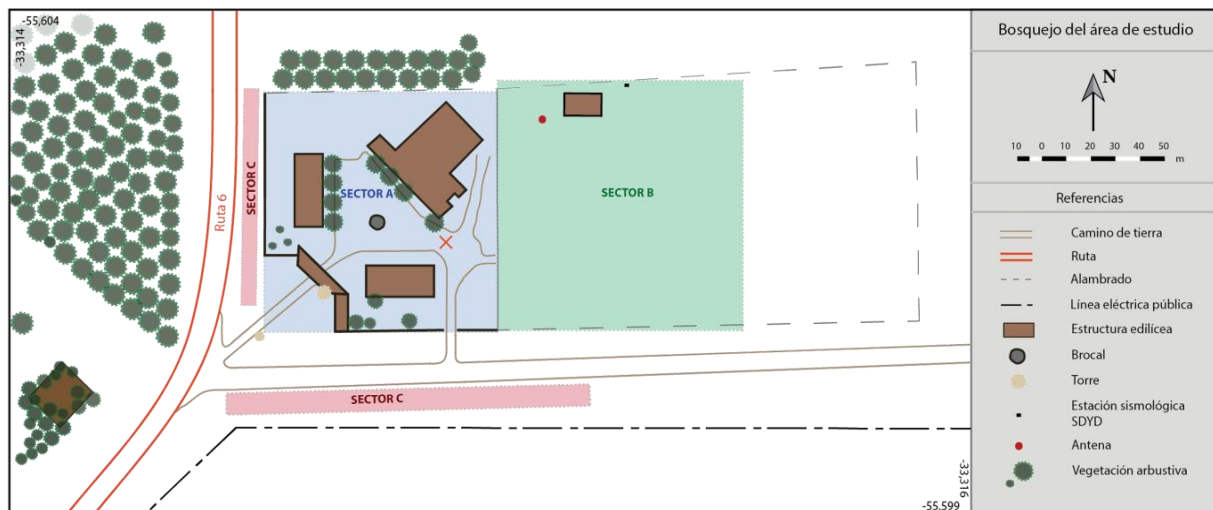


**Figura 8.** Imagen de antena 900 MHz y cable que conecta a computadora.

## (6) Zona de estudio

El Cuartel Paso del Rey es una zona con diversas construcciones por lo que es necesario, de ser posible, identificar edificaciones, sanitaria, cableados de luz, previo a las actividades de prospección geofísica. A pesar de no contar con mapas de distribución exacta de los elementos mencionados, el predio puede subdividirse en tres sectores (Figura 9):

- Sector A: centro del cuartel. Es donde se encuentran las habitaciones, comedor, administración, museo, cocina, galpones, talleres y los principales sistemas sanitarios y eléctricos. Estas construcciones se disponen alrededor de un patio interior por donde hay circulación vehicular. En el centro de este espacio, se encuentra un aljibe a cuyo interior es posible acceder a su interior.
- Sector B: zona descampada donde se realizan actividades de equinoterapia, movilización de tanques militares, actividades deportivas y recreativas. Aquí también se encuentra una antena de radio y la estación sismológica de la red UY, SDYD.
- Sector C: Fuera del predio militar al costado de la ruta n°6 (Sector C Oeste) y camino (Sector C Sur). Es de destacar que sobre el Sector C Sur hay un tendido eléctrico.



**Figura 9.** Mapa del Cuartel militar *Paso del Rey* y alrededores. Se encuentran señalizados los sectores tratados en el texto. La cruz roja indica la zona en la que fue encontrado el túnel.



## (7) Hipótesis

La estructura a identificar, según la información previa, podría tener una altura de 2 m y un ancho de 1,2 m (dos personas aproximadamente). El techo del túnel se encontraría bastante superficial y presentaría dirección SE o SSO (admitiendo ramificaciones). Según el personal del cuartel, el túnel estaría parcialmente derrumbado por lo que podría estar dividido en dos secciones, ya que al momento de su descubrimiento se derrumbó parte del techo y se tapió la sección transversal. Así también podrían existir otras secciones derrumbadas.

Ya que las personas que se encontraban en el momento de su descubrimiento pudieron descender al interior de la estructura, es de esperar que el interior de la misma se encuentre vacío. Sin embargo, también podría haber agua y/o sedimentos por infiltración a través de zonas fracturadas o derrumbadas o material del propio derrumbe. Este amplio abanico de posibilidades genera inconvenientes durante la interpretación de anomalías debido al amplio rango de valores de resistividad que se podrían obtener. Un indicador importante, sería obtener valores de resistividad extremadamente altos, en el orden de los 10000  $\Omega\text{m}$  relacionado a la condición dieléctrica del aire. Si presentara agua en su interior, resistividades muy bajas, alrededor de 10  $\Omega\text{m}$  dependiendo de su composición (ver conducción electrolítica) serían esperables. Esta última hipótesis es más compleja que la anterior ya que para que se cumpla, gran parte del volumen del túnel debería estar compuesto de agua. De todas formas, tal como se explicó en las secciones 4.2 y 4.3, los valores estándares adjudicados al aire y agua no siempre son los obtenidos en tomografías eléctricas. Martínez-López et al. (2013) obtienen valores diferentes de resistividades para galerías subterráneas vacías.

Por otro lado, el área de estudio presenta diferentes factores que des-optimizan la técnica de Georadar; por ejemplo, la presencia de una antena de radio de frecuencias desconocidas, un tendido eléctrico ubicado próximo al Sector C Sur y la presencia de muchos obstáculos superficiales (paredes, árboles, baldosas, pedregullo, etc.). Sumado a esto, si se cumple que efectivamente hay una capa superficial de bajas resistividades eléctricas, la absorción de las ondas dificultaría la detección de la estructura.

Para resolver la problemática del tendido eléctrico y la antena de radio, lo único que resta hacer es intentar filtrar la señal en la etapa de post-procesamiento. Por otra parte, la presencia de obstáculos superficiales puede subsanarse utilizando antenas "blindadas", como las utilizadas.

En función de todo esto y considerando que la estructura podría encontrarse cerca de la superficie se entiende que, para que efectivamente sea detectado el túnel, será necesaria la existencia de grandes contrastes entre su interior y la interfaz de sus paredes con la roca caja.

En cuanto a las litologías presentes en el subsuelo, dado que nos situamos geológicamente en el borde de cuenca fanerozoica y considerando también la presencia de afloramientos de basamento a menos de 3 km a la redonda (en la entrada Sur a la ciudad de Sarandí del Yí) y algún otro pequeño afloramiento aislado a 2 km al Norte del cuartel, es de esperar que el mismo no se encuentre a mucha profundidad. Por otro lado, la ausencia de afloramientos próximos y la identificación de arcillas en los primeros tres metros de profundidad sugieren la identificación de niveles de baja resistividad en los primeros metros de las tomografías eléctricas.

## (8) Metodología

El primer paso consistió en entablar conversaciones con el personal del cuartel para obtener información respecto a la localización del área donde fue encontrado el túnel y conocer las características del mismo.

Posteriormente, durante el reconocimiento de la zona de estudio, se identificaron aquellos obstáculos que pudieran dificultar la realización de las medidas (presencia de paredes, muros, baldosas, adoquines, pedregullo, arena compactada, entre otros).

Una vez cumplidas estas etapas se procedió a la planificación de la ubicación de las líneas de medida a realizar en las sucesivas salidas de campo. Se realizaron tres campañas distribuidas desde mediados de 2018 y mediados de 2019 donde se aplicó en primera instancia la Tomografía eléctrica y en la última campaña el Georadar.

Posteriormente se procesaron y analizaron los resultados.

### (8.1) Adquisición de los datos

La selección de la ubicación de las líneas de tomografía eléctrica se basó en considerar como referencia la zona donde fue ubicado el túnel y a partir de esto, intentar interceptar la estructura en diferentes secciones. Por este motivo, se realizaron tomografías con diferentes direcciones.

Considerando la necesidad de obtener buena resolución en superficie y no necesariamente alcanzar grandes profundidades, la distancia entre electrodos fue de entre 30 y 50 cm. Se realizó sin embargo una línea donde esta distancia fue de 2 m, ya que se quiso alcanzar gran profundidad para obtener una visualización mayor de la distribución de las resistividades del subsuelo (Tabla 1).

Fueron realizadas siete líneas de Tomografía eléctrica y un arreglo en grilla distribuidas tal como se muestra en la Figura 10, cuyas características están resumidas en la Tabla 1. Todas consistieron en tendidos eléctricos de cuatro rollos de cable excepto la Línea 1 y la Línea 6, las cuales se realizaron con dos rollos y tres rollos respectivamente. En el último caso se aplicó el método de *roll allong* (ver Anexo III por más detalles de la configuración de los

tendidos eléctricos). Además, se hizo un arreglo en grilla para obtener un modelo tridimensional.



**Figura 10.** Localización de las tomografías eléctricas realizadas. Sistema de referencia WGS 84

**Tabla 1.** Características de los tendidos eléctricos.

Arreglo electrónico	Largo del tendido (m)	Distancia inter-electrodo (m)
Línea 1	20	0,50
Línea 2	40	0,50
Línea 3	24	0,30
Línea 4	16	0,40
Arreglo 3D	18 x 6,5	2 x 1,3
Línea 5	24	0,30
Línea 6	18,2* y 30**	0,30
Línea 7	160	2

\* Largo del tendido para el método Wenner

\*\* Largo del tendido para el método Dipolo - Dipolo. Se usó *roll along*.

En cuanto al Georadar, se realizaron 13 medidas (Figura 11). Para la planificación de las mismas, se consideraron las anomalías detectadas con las tomografías eléctricas. La elección de antenas con frecuencias de 500 MHz y 900 MHz también tuvo el fundamento de obtener buena resolución en superficie.



**Figura 11.** Ubicación de las líneas de medida con Georadar. Antena con frecuencia central de 500 MHz (a) y 900 MHz (b). En a, las líneas de G1 a G5 se encuentran cada 0,7 m aprox. En b las líneas G10, G11 Y G12 presentan una distancia entre ellas de aproximadamente 1,5 m.

### (8.1) Procesamiento de los datos

Para el procesamiento de las tomografías 2D, se usó el *software* RES2DINV para *Windows* mientras que para la tomografía 3D se usó el *software* RES3DINV para *Windows*. El armado del cubo tridimensional se realizó utilizando el programa *Voxler*. Previo a la inversión se eliminaron los datos erróneos (*bad points*) y se usó un modelo *refinado* para todas las inversiones (excepto para la Línea 3 mediante el método Wenner, Línea 6 con método Wenner y para la Línea 7). El modelo de inversión se basó en el método de *finite difference* y en algunos casos se aplicó el modelo "refinado" para mejorar la precisión de las anomalías.

Debido a que las medidas fueron de corta longitud en una región donde la topografía no presenta importantes pendientes, este factor no fue considerado.

Por otra parte, los datos de GPR fueron procesados con el programa *Prism2* de *Radar Systems Inc.* para *Windows*. A todos los datos se les aplicó un filtro de remoción de ruido de fondo (*background removal*) y se le incrementó el valor de la ganancia para tiempos de viaje más altos con el objetivo de subsanar la atenuación de la señal.

## (9) Resultados y Discusión

### (9.1) Identificación del túnel

Como fue mencionado anteriormente, se realizaron siete líneas de medida para obtener perfiles bidimensionales y un arreglo en grilla para generar un modelo tridimensional.

De todas las tomografías eléctricas realizadas, solamente en la Línea 3 y Línea 4 se detectó alguna anomalía que sugiriera un análisis más profundo para su correlación con el túnel. Por otro lado, con el GPR se identificaron diversas respuestas a analizar.

Asimismo debe tenerse en cuenta que debido a la falta de planos eléctricos o sanitarios para determinar la ubicación precisa de elementos subterráneos, es indeterminada la presencia total de elementos enterrados que puedan generar ruido a la señal y por lo tanto la dificultad de establecer la correlación entre las anomalías identificadas y el túnel.

#### (9.1.1) Resultados Tomografía Eléctrica

La Línea 3 (Figura 12) fue desplegada sobre arena y balasto compactado de los caminos interiores del cuartel. La Línea 4 se realizó sobre suelo aunque cabe destacar que se suprimieron cuatro electrodos debido a la presencia de baldosas en el espacio disponible para el tendido (Figura 13). Detalles de estos tendidos eléctricos se encuentran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Características de los arreglos electródicos de las líneas 3 y 4.

Arreglo electródico	Largo del tendido (m)	Distancia inter-electrodo (m)	Profundidad alcanzada Wenner (m)	Profundidad alcanzada Dipolo - Dipolo (m)
Línea 3	24	0,30	4,09	5,98
Línea 4	16	0,40	2,62	2,62

En los perfiles de Dipolo-Dipolo y Wenner realizados en la Línea 3 (Figura 12) se identificó una electrofacie de baja resistividad (5-13  $\Omega$ m), cuya base se encuentra a 1,10 m de profundidad y una electrofacie infrayacente de resistividades entre 20 y 35  $\Omega$ m.

Sin embargo, aquello que más llama la atención es la anomalía de alta resistividad relativa (mayor a  $140 \Omega\text{m}$ ) alargada en dirección vertical con contactos netos cuya forma y dimensiones son pequeñas para considerarla un cuerpo geológico (TA<sub>2</sub>, Figura 12c).



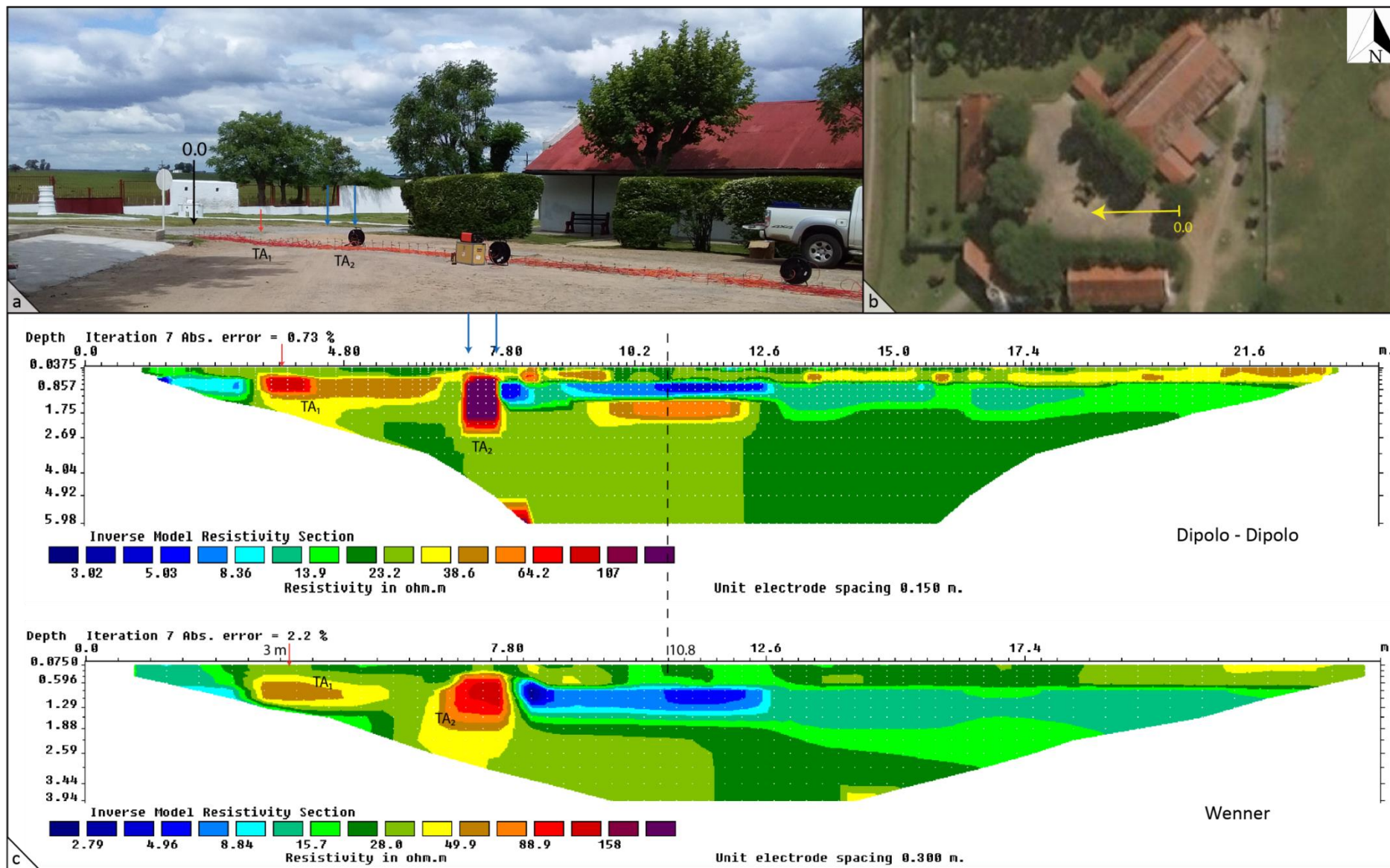


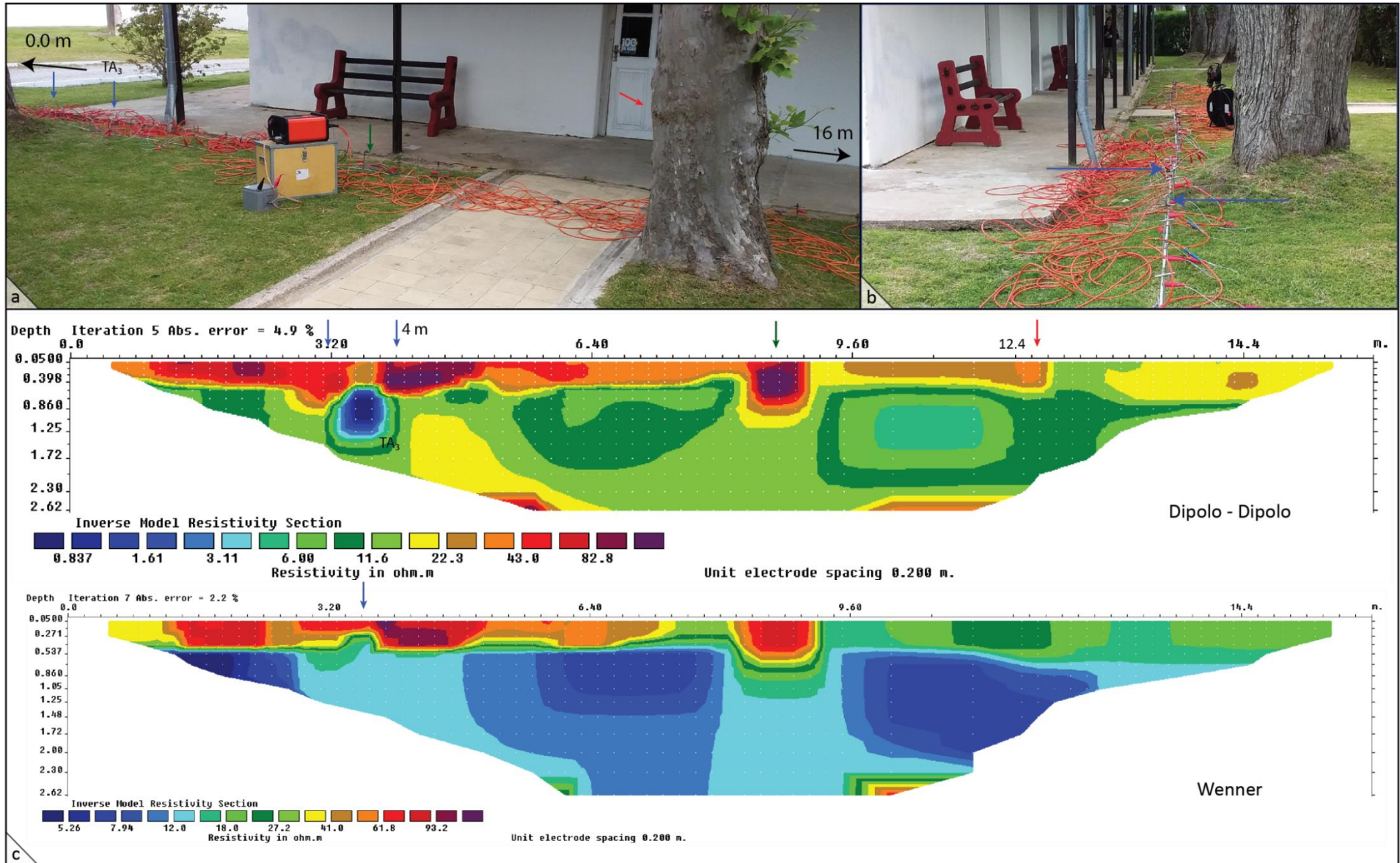
Figura 12. Imagen del tendido eléctrico correspondiente a la Línea 3 (a) y su ubicación (b). c. Resultados según el método Dipolo-Dipolo y Wenner. Se indican en cada uno de los perfiles las anomalías de interés y en línea discontinua una referencia geográfica correspondiente a una cámara séptica de hormigón.

En cuanto a la morfología de la anomalía, son notorias las diferencias en los resultados obtenidos por Wenner y Dipolo - Dipolo. Esto se vincula con los patrones de sensibilidad de cada método. Dipolo - Dipolo tiene mayor sensibilidad ante cambios horizontales de resistividad, por lo que define con mayor precisión estructuras verticales. Wenner por el contrario define con mejor precisión estructuras que están dispuestas en modo horizontal. A este respecto, diversos autores destacan al método Dipolo - Dipolo frente al Wenner en la prospección de galerías y cavidades (Hidalgo et al. 2010; Reynolds 2011; Putiška et al. 2012; Martínez-López et al. 2013).

Asumiendo que esta anomalía correspondiera a la estructura a identificar, los valores de resistividad obtenidos son considerablemente menores al esperado en caso de contener aire en su interior. Esto puede deberse a distintas razones. Por un lado, la distancia entre electrodos puede no ser la adecuada para obtener suficiente resolución. Amini & Ramazi (2017) muestran mediante modelaje sintético cómo decrecen los valores de resistividad de un objeto que genera una anomalía para un mismo tendido eléctrico a medida que decrece su tamaño. El contraste de resistividad en la interfaz objeto-entorno cumple un rol importante en este sentido, pudiendo incluso generar que un cuerpo enterrado de alta resistividad sea visualizado en una tomografía como un cuerpo altamente conductivo (Putiška et al. 2012). Según Putiška et al. (2012), cuanto más próximo esté la relación entre ambas resistividades a 0,1 la visualización de la cavidad es cada vez menos legible.

Una segunda anomalía aparece en esas mismas tomografías (TA<sub>1</sub>), donde también es posible observar un pasaje brusco lateralmente hacia una zona de baja resistividad. Esta anomalía podría corresponder con algún objeto enterrado aunque su determinación es pobre por encontrarse al inicio del perfil.

Por otra parte, en la Línea 4 (Figura 13) se destaca una anomalía de baja resistividad (TA<sub>3</sub>) que se puede distinguir fácilmente en el perfil Dipolo - Dipolo con dimensiones de 0,4 m de ancho y 1 m de alto aproximadamente. Presenta resistividades entre los 0,5 y 11  $\Omega$ m y se encuentra dentro de una electrofacie de resistividades en el entorno de los 11,7  $\Omega$ m. No es observable en los resultados generados por el método Wenner incluso al cambiar la escala.



**Figura 13.** Tendido eléctrico correspondiente a la Línea 4 (a, b). Resultados según el método Dipolo-Dipolo y Wenner (c). Las flechas azules que se encuentran en a, b y c indican la anomalía de mayor interés. La flecha roja en c señala la ubicación del árbol en la imagen a y la flecha verde indica una tercera anomalía.

Como se puede observar en la Figura 13a y 13c, la anomalía en cuestión (TA<sub>3</sub>) se desarrolla próxima a un árbol. ¿Podría corresponder con esto? Según Schmaltz & Uhlemann (2016) el área abarcada por las raíces de un árbol (principalmente aquél donde se desarrolla la mayor densidad de raíces) presenta resistividades más altas respecto al suelo que lo rodea debido a la absorción del agua intersticial, resultado contrario al obtenido. Sin embargo, a los 11,6 m de este tendido, se localiza un segundo árbol (flecha roja en Figura 13a,c), el cual, no generó anomalía similar a TA<sub>3</sub>. En este último caso, se destaca que próximo a los 11,6 m se encuentra una zona sin datos debido a la supresión de cuatro electrodos por la presencia de baldosas.

Por otro lado, se observa que la anomalía TA<sub>3</sub> se localiza en un lugar consistente con el caso hipotético según el cual el túnel iría, desde la zona indicada en la Figura 9, con dirección SSO (próximo a N-S). Considerando que así fuera, la no detección de la anomalía mediante Wenner podría explicarse por un bajo contraste de resistividad en la interfaz *túnel-roca caja*. Los valores bajos pueden deberse a un estado de preservación del túnel (debido incluso a las raíces del árbol) o presencia de material sedimentario alrededor que permita mayor permeabilidad y humedad en sus paredes. La posibilidad de que la causa de bajas resistividades dentro de cavidades sea el ingreso de sedimentos saturados en agua ha sido verificado por Martínez López et al. (2007).

Una última anomalía a destacar es la indicada con flecha verde en la Figura 13. Esta anomalía no se diferencia completamente del nivel de altas resistividades relativas que se ubica más próximo a la superficie en el perfil. Esto podría implicar que sean irregularidades en dicho nivel o asociado a una cámara de tendido eléctrico que suministra corriente al edificio.

### (9.1.2) Resultados Georadar

Los resultados obtenidos, indican una serie de anomalías en todas las líneas de medida. Debido a la imprecisión en la georeferenciación de estas líneas, se estima un error de  $\pm 1,5$  m, resultando en una cifra significativa dado el detalle del estudio.

Las líneas verticales en color rojo numeradas<sup>5</sup> en los radargramas corresponden a las marcas por metro sobre el sentido de avance de la antena sobre la superficie. Comúnmente se utiliza un odómetro para registrar la distancia, sin embargo en esta oportunidad se encontraba dañado, lo cual aumenta la imprecisión en la ubicación de las anomalías.

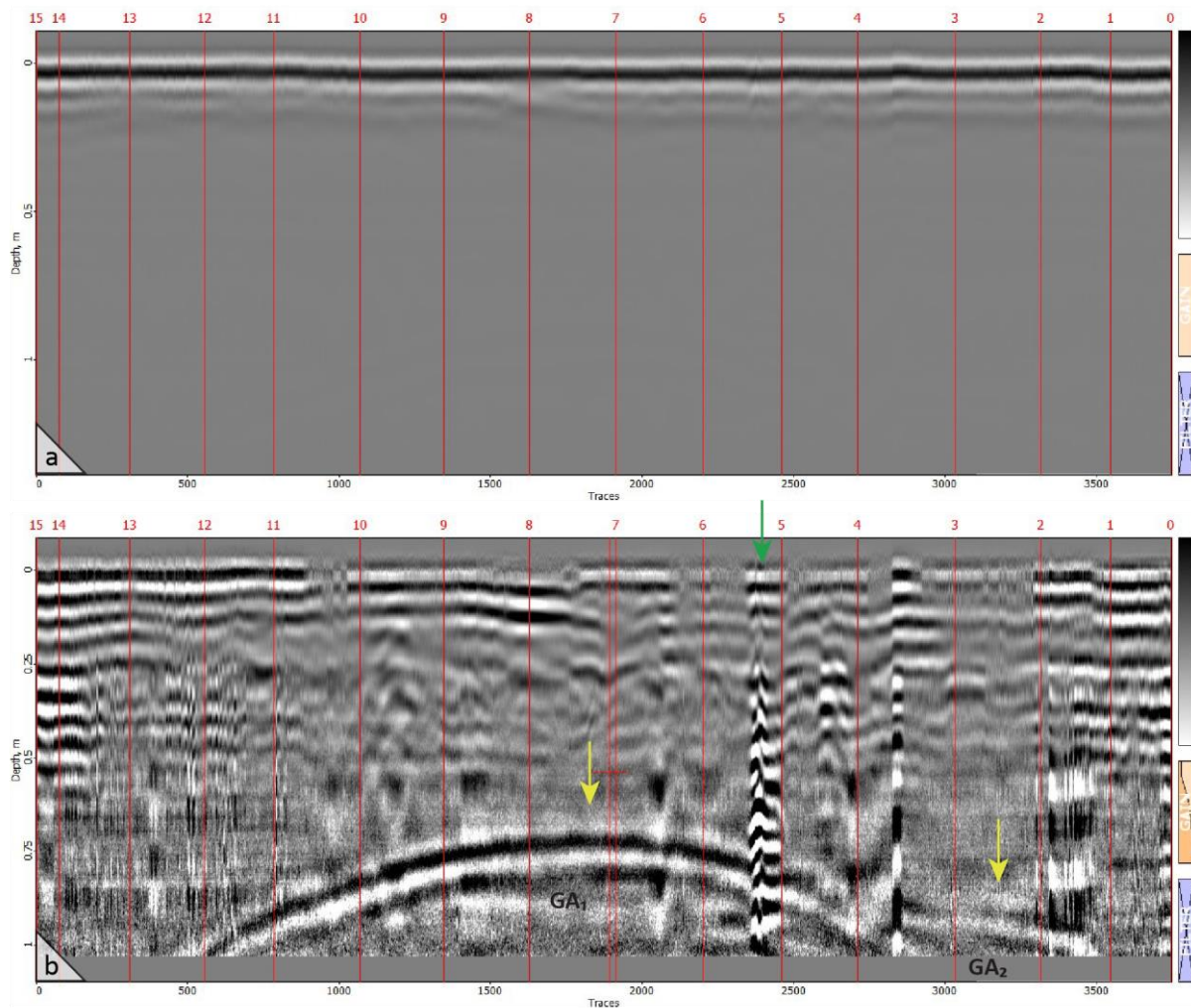
#### (9.1.2.a) Resultados Georadar Sector A

Los resultados que se exponen a continuación corresponden con las líneas G1, G2, G3 y G6, realizadas con la antena de 900 MHz, las líneas G8 y G9 con la antena de 500 MHz y la línea G7 con ambas antenas.

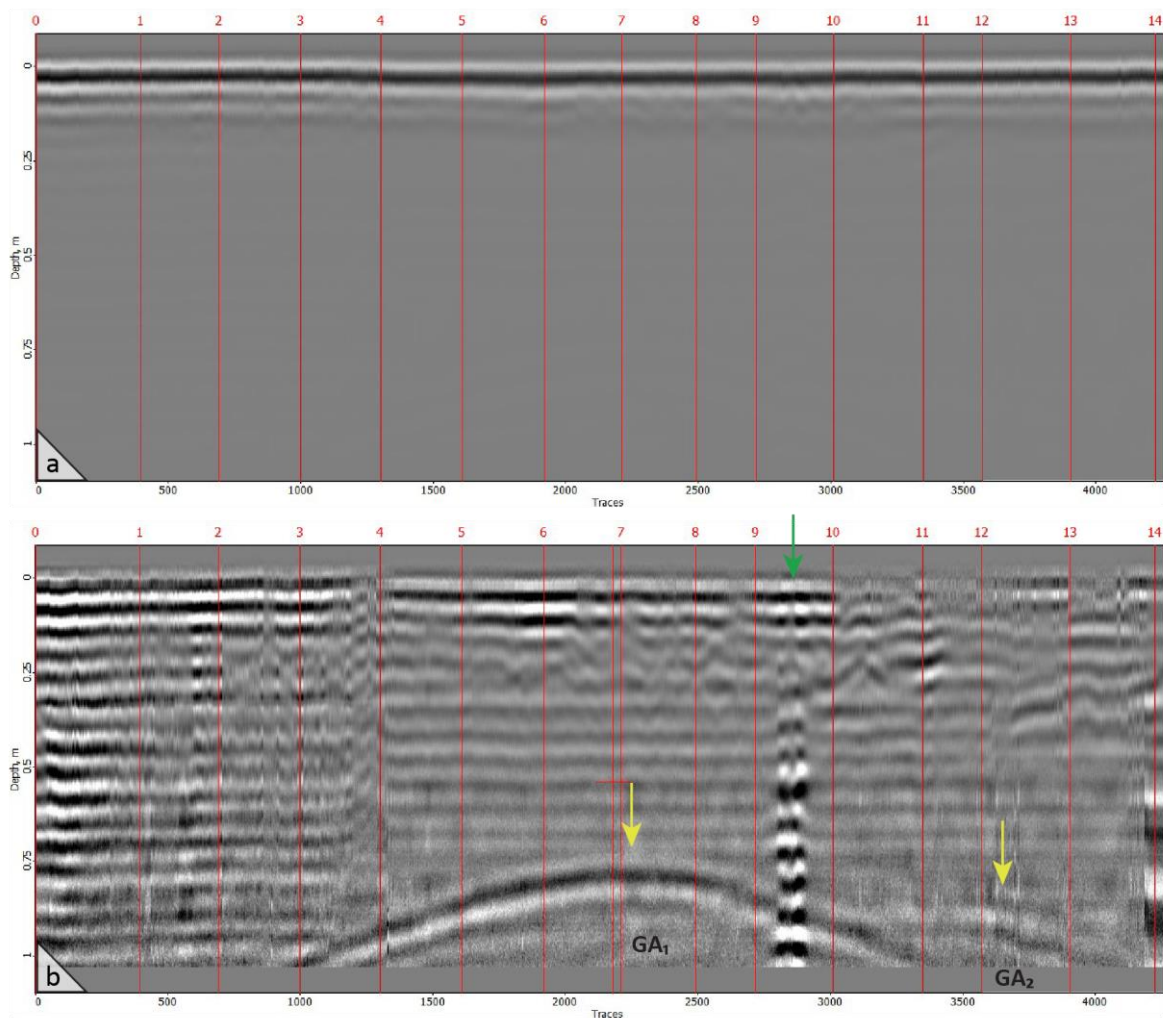
Como se puede observar en las siguientes figuras, la señal en crudo resultó bastante atenuada. Por el contrario, hipérbolas bien definidas se visualizan cuando se incrementa la ganancia. En estos radargramas se identifican hipérbolas, denominadas GA<sub>1</sub>, a la mitad de las líneas G1 (Figura 14) y G2 (Figura 15). En estos mismos radargramas, se identificó además un segundo reflector cuya respuesta presenta disposición vertical (indicado con flecha verde) y un tercer reflector levemente registrado (GA<sub>2</sub>). En la línea G3 (Figura 16) se puede observar una mayor cantidad de reflectores dificultando la correlación con las anomalías anteriormente mencionadas.

---

<sup>5</sup>Cuando las medidas de Georadar no se realizan con odómetro sino con marcas, la ubicación en la lateral de cada traza es en función de la tasa de muestreo y la cantidad de pulsos por segundo que tiene pre-configurado el equipo.

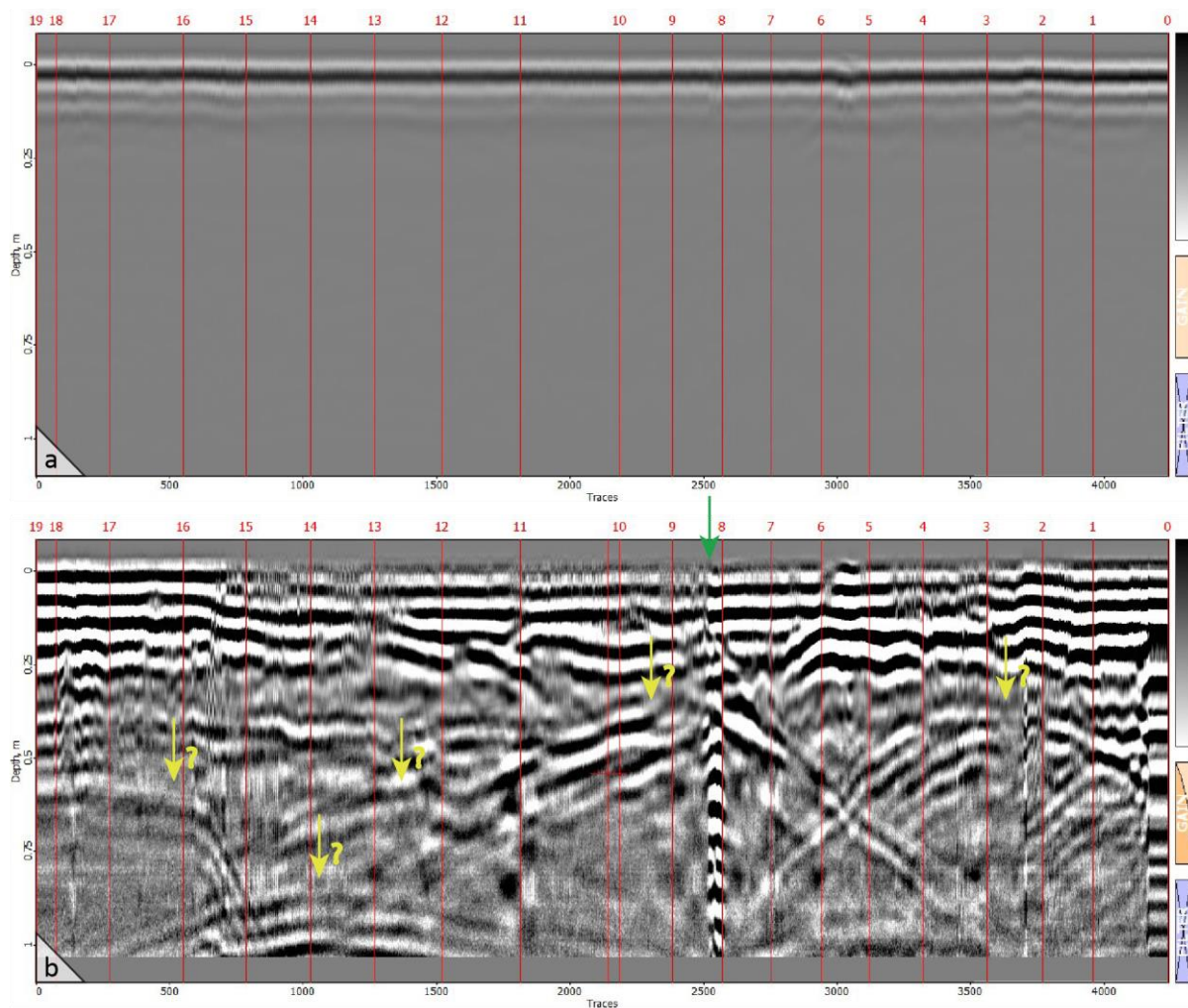


**Figura 14.** Resultados de la línea G1 con la antena de 900 MHz y permitividad impuesta de 40. **a.** Dato en crudo. **b.** Resultado luego de ajustar el *Zero point*, quitar el ruido de fondo y modificar la función de ganancia para cada traza.



**Figura 15.** Resultados de la línea G2 con la antena de 900 MHz y permitividad impuesta de 40. **a.** Dato en crudo. **b.** Resultado luego de ajustar el *Zero point*, quitar el ruido de fondo y modificar la función de ganancia para cada traza.

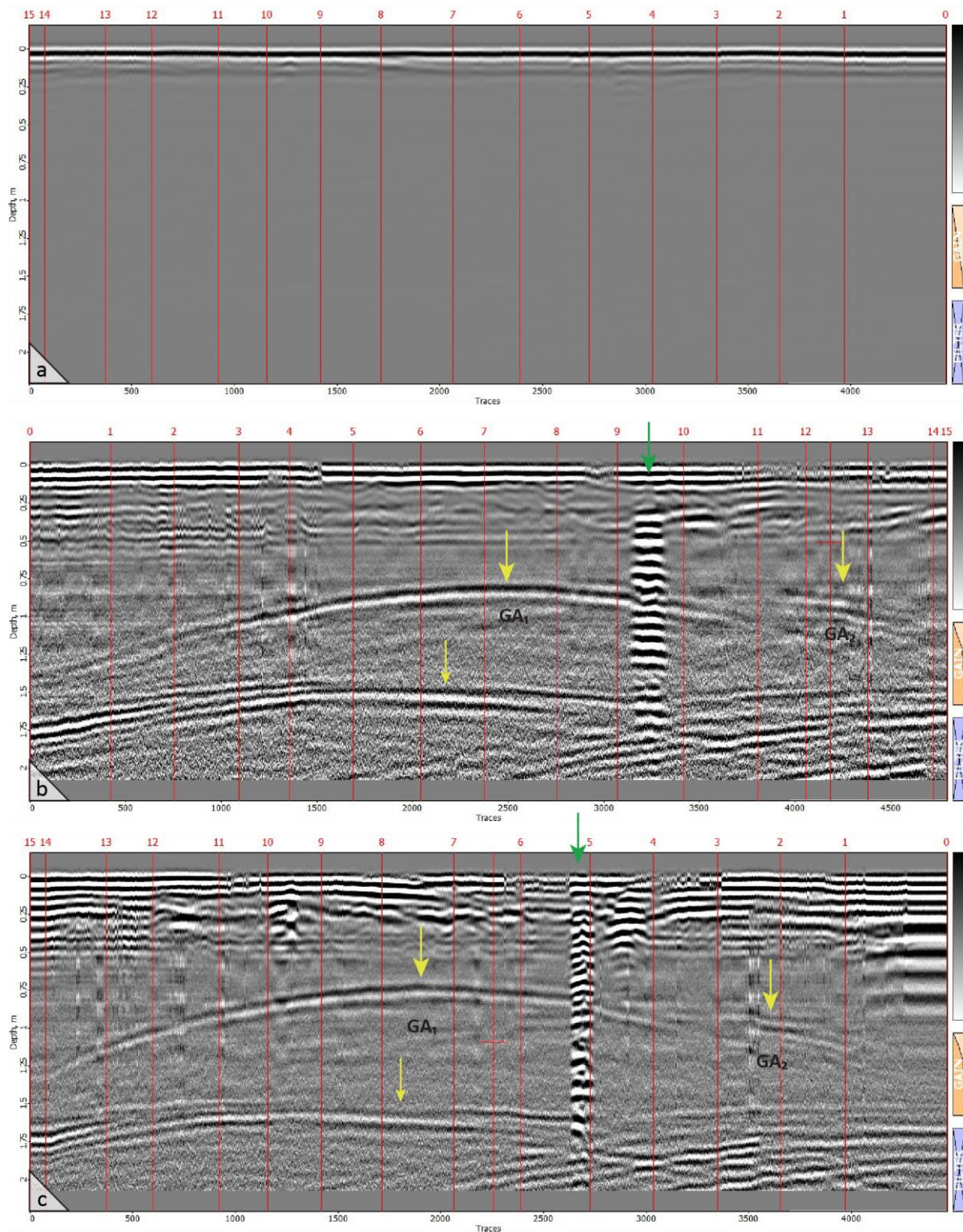
La anomalía de disposición vertical identificada en las tres líneas paralelas, representa un tipo de señal característico conocido como *ringing* (Annan, 2004). Este tipo de señales ocurren cuando las ondas emitidas rebotan repetidamente dentro del objeto o entre dos o más objetos, pudiendo éste correlacionarse con un cable de corriente enterrado (Pueyo et al. 2005).



**Figura 16.** Resultados de la línea G3 con la antena de 900 MHz y valor de permitividad de 40. **a.** Dato en crudo. **b.** Resultado luego de ajustar el *Zero point*, quitar el ruido de fondo y modificar la función de ganancia para cada traza.

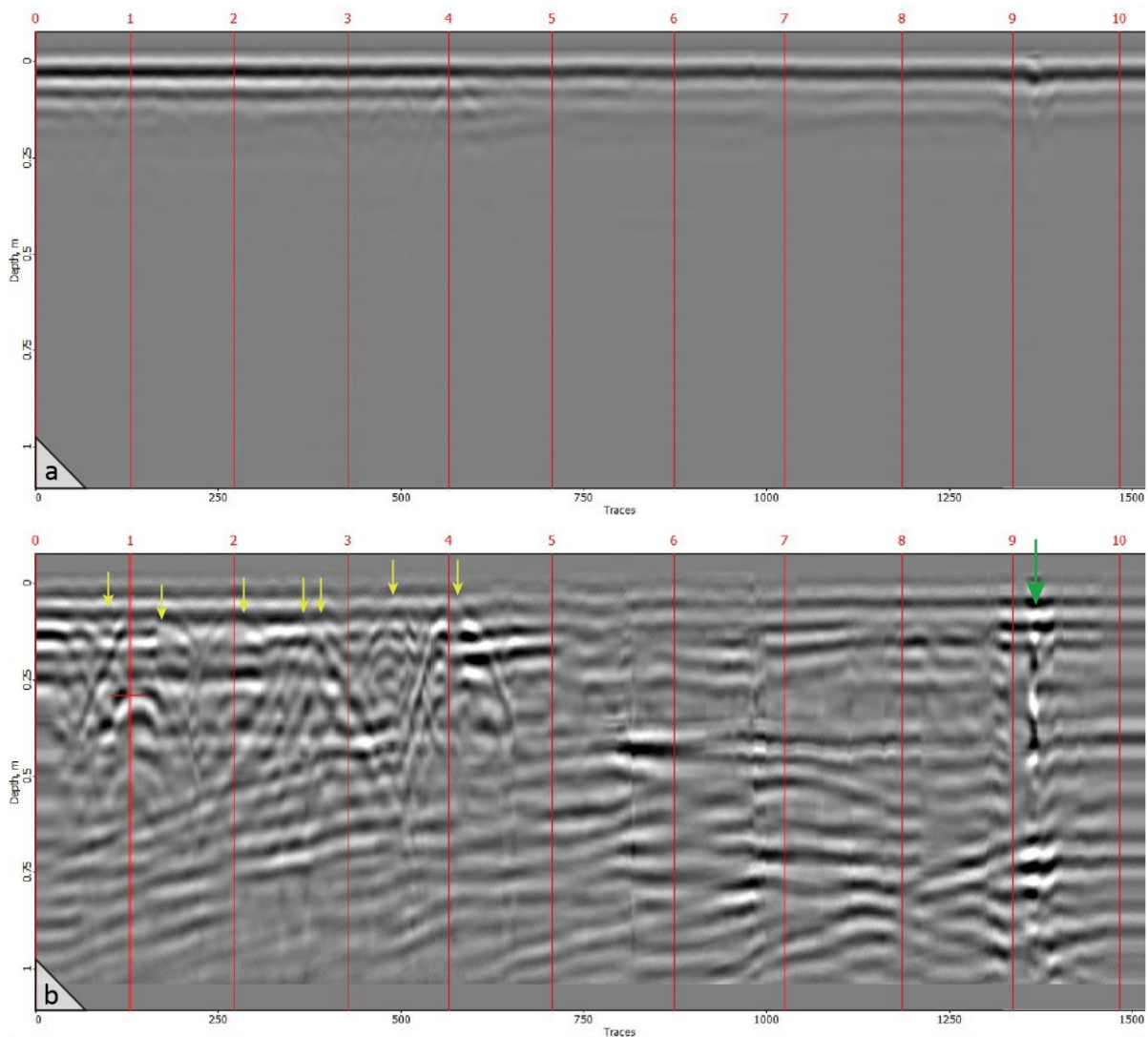
En la Figura 17, se repite la medida de la línea G1 alcanzando mayor profundidad. Esto es porque previo a la medida, se cambió el valor del parámetro *range* a un valor de 100. Este parámetro se vincula con la ventana de tiempo que la antena receptora considerará para recibir la señal.





**Figura 17.** Resultados de la línea G1 con la antena de 900 MHz, un valor de *range* de 100 y permitividad impuesta de 40. **a.** Dato en crudo. **b.** Resultado luego de ajustar el *Zero point*, quitar el ruido de fondo y modificar la función de ganancia para cada traza (ida). **c.** Lo mismo que en **b** (vuelta).

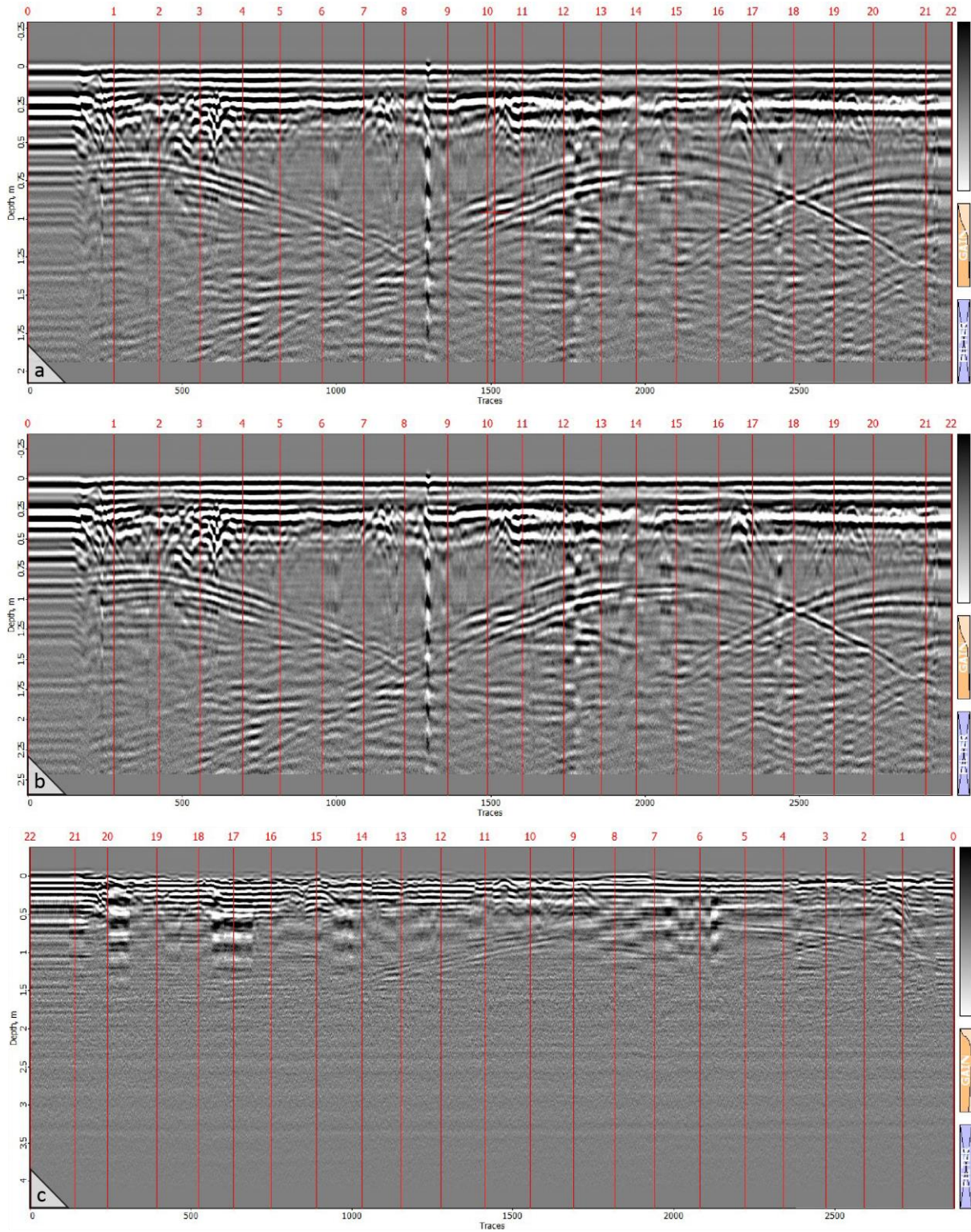
La Línea G6 se realizó en el mismo lugar que la Línea 4 de tomografía eléctrica. En sus resultados (Figura 18) se puede observar una serie de hipérbolas de estrecha abertura localizadas en los primeros 4 m y la señal tipo *ringing* a los 9 m. Luego, existe una serie de interferencias en la señal observándose múltiples curvas pero sin mucha definición.



**Figura 18.** Resultados de la línea G6 con la antena de 900 MHz y valor de permitividad de 40. **a.** Dato en crudo. **b.** Resultado luego de ajustar el *Zero point*, quitar el ruido de fondo y modificar la función de ganancia para cada traza.

Para finalizar con este sector, se muestran los resultados de la Línea G7 con ambas antenas (Figura 19).

*Detección de estructuras subterráneas en el cuartel "Paso del Rey", Sarandí del Yí (Departamento de Durazno)*



**Figura 19.** a, b. Radargrama de la Línea G7 (con antena de 900 MHz) y permitividades impuestas de 40 y 25 respectivamente. c. Radargrama de la Línea G7 (antena de 500 MHz) con permitividad impuesta de 40.

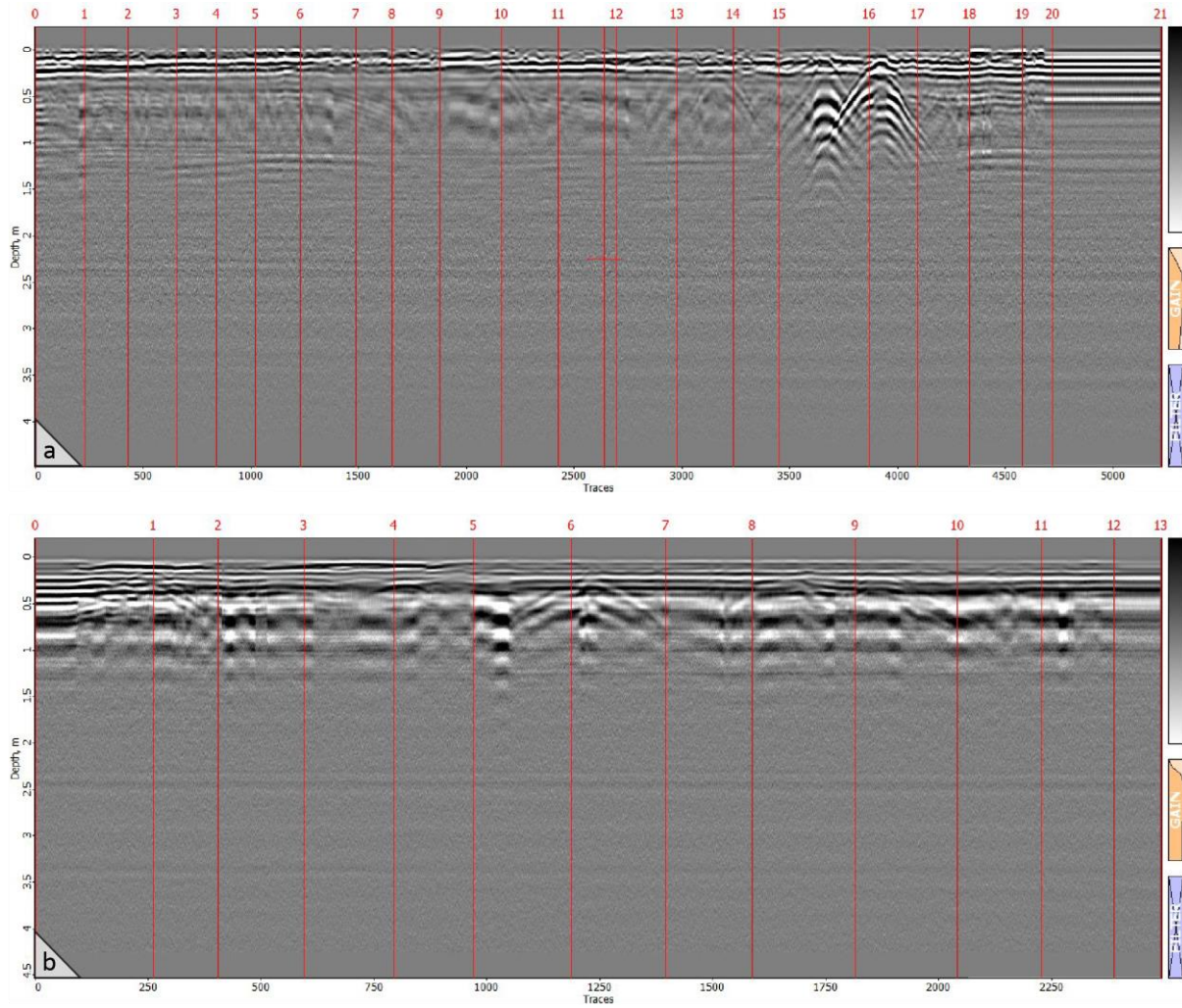
La diferencia en las figuras 19a y 19b es únicamente el cambio en el valor impuesto de permitividad: 40 y 25 respectivamente, donde se puede observar cómo el radargrama no varía, solo cambia la escala. En los tres resultados presentados se distingue una serie de hipérbolas superficiales de estrecha abertura y tres hipérbolas de dimensiones interesantes localizadas un poco más en profundidad con aberturas mayores. Todas ellas se caracterizan por estar constituidas por hipérbolas múltiples, dando un aspecto similar al *ringing*, pudiendo indicar presencia de agua dentro del objeto contenedor, o un efecto producido por el material de los objetos enterrados. Según declaraciones del personal del cuartel, es posible que en esa zona se encuentren cloacas/desagües. Es de destacar la menor representatividad de estas anomalías en el resultado de la antena de 500 MHz (Figura 19c), debido posiblemente a la disminución en la resolución.

El valor de permitividad de 40 impuesto en los resultados de Georadar es el valor máximo esperable considerando los valores de resistividad obtenidos en las tomografías y el tipo de materiales que compondrían el subsuelo en este sector (arenas, limos, arcillas). Este factor influye en la escala de profundidad del radargrama y por lo tanto, la profundidad de los ápices de las hipérbolas detectadas. Por ejemplo, considerando un valor mínimo de 25 y un máximo de 40, según la recopilación de valores de permitividad para materiales de Reynolds (2011) y considerando los valores de resistividad en el entorno de  $28 \Omega\text{m}$  (Línea 3 de tomografía eléctrica), el ápice de la hipérbola  $GA_1$  varía entre 1 m y 0,7 m aproximadamente.

#### (9.1.2.a) Resultados Georadar Sector C

A continuación se presentan los radargramas de las líneas realizadas por fuera del cuartel con la antena de 500 MHz (Figura 20). La permitividad impuesta fue de 40, aunque con un valor de 25 no hubo cambio significativo en la escala de profundidad. En los resultados correspondientes se observan hipérbolas bastante superficiales con aspecto tipo *ringing* sugiriendo metales enterrados.

*Detección de estructuras subterráneas en el cuartel "Paso del Rey", Sarandí del Yí (Departamento de Durazno)*



**Figura 20. a, b.** Líneas G8 y G9 (con la antena de 500 MHz) respectivamente con una permitividad impuesta de 40.

## (9.2) Estudio del subsuelo

A falta de fiabilidad en valores de velocidad de las ondas electromagnéticas en el Georadar, el análisis del subsuelo se basará en las ocho tomografías realizadas (Tabla 3).

**Tabla 3.** Profundidades alcanzadas por los arreglos electródicos considerados en esta sección.

Arreglo electródico	Largo del tendido (m)	Distancia inter-electrodo (m)	Wenner (m)	Dipolo - Dipolo (m)	Schlumberguer (m)	Gradient (m)
Línea 1	20	0,50	3,28	3,28	3,73	-
Línea 2	40	0,50	6,78	-	-	-
Línea 3	24	0,30	4,09	5,98		
Línea 4	16	0,40	2,62	2,62		
Arreglo 3D	18 x 6,5	2 x 1,3	-	-	-	4
Línea 5	24	0,30	4,09	5,98	-	-
Línea 6	18,2* y 30**	0,30	3,59	5,98	-	-
Línea 7	160	2	24,2	44,9	-	-

\* Largo del tendido para el método Wenner

\*\* Largo del tendido para el método Dipolo - Dipolo. Se usó *roll along*.

La Línea 1 fue tendida sobre el camino de entrada de vehículos al cuartel (Sector A, Figura 21). El mismo está compuesto por arena y tierra compactada y por encima, un nivel de clastos tamaño grava con morfología brechoide. Esta condición del terreno dificulta la inserción de los electrodos y debido a su baja humedad, fue necesario verter agua para la buena conducción de electricidad en la interfaz suelo-electrodo. En este tendido se realizaron tres medidas con tres dispositivos eléctricos diferentes: Wenner, Dipolo-Dipolo y Schlumberger con el objetivo de comparar los resultados. Si bien existen diferencias, en todas las tomografías se pueden identificar tres niveles. Avanzando en profundidad, se encuentra una primera capa de resistividades relativamente mayores, luego, una capa de baja resistividad y por último, al metro treinta aproximadamente (dependiendo del método), los valores vuelven a incrementarse.

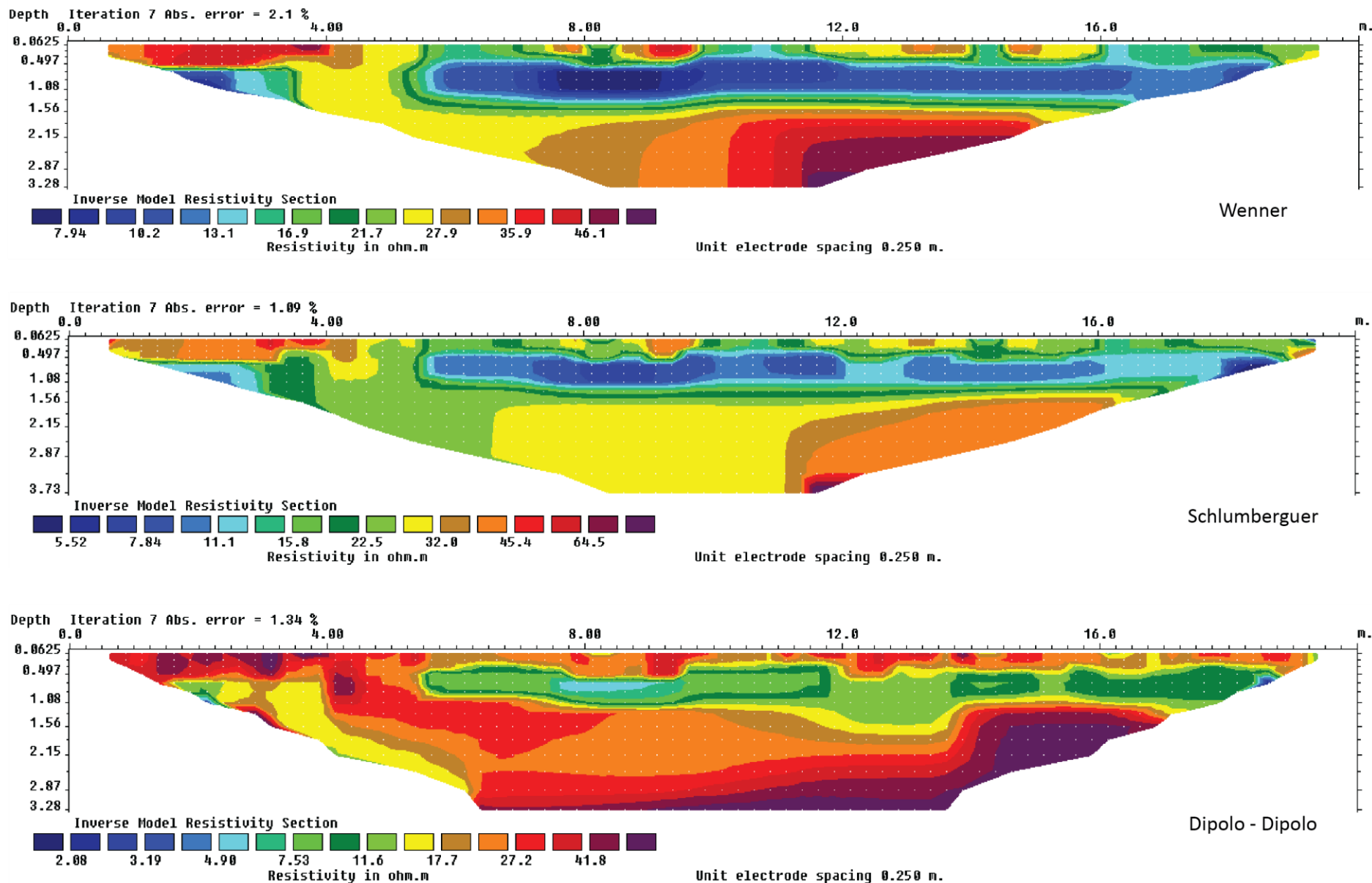
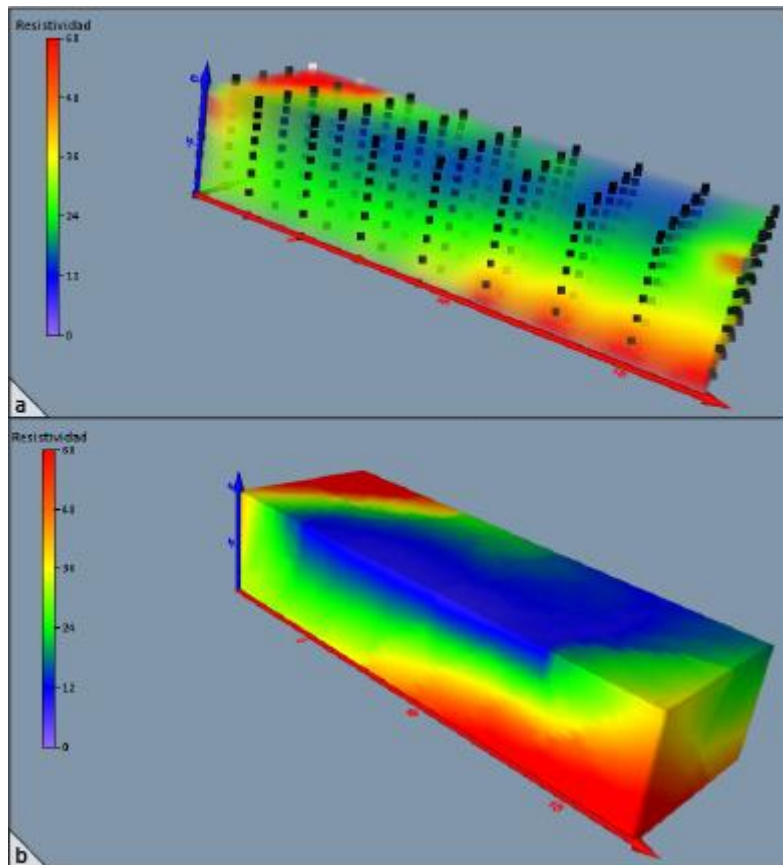


Figura 21. Resultados correspondientes a la Línea 1 mediante Wenner, Schlumberger y Dipolo – Dipolo.

Adyacente a esta línea, se realizó una tomografía 3D bajo una grilla rectangular (ver anexo III) alcanzando una profundidad de 4 m aproximadamente. El eje mayor de este arreglo presentó dirección casi perpendicular a la Línea 1. En la Figura 22 se presenta el resultado utilizando el método *Gradient*, de la inversión de los datos y la interpolación de los mismos utilizando el *software Voxler*, el cual muestra diferencias en comparación con los resultados de la Línea 1.



**Figura 22. a.** Distribución de puntos de medida en el arreglo tridimensional. **b.** Modelo final obtenido.

La Línea 2 fue tendida directamente sobre suelo (Sector B, Figura 23). Debido a la mayor longitud del tendido, la profundidad alcanzada fue mayor (Tabla 3). Sin embargo, el resultado fue muy similar a aquél de la Línea 1.



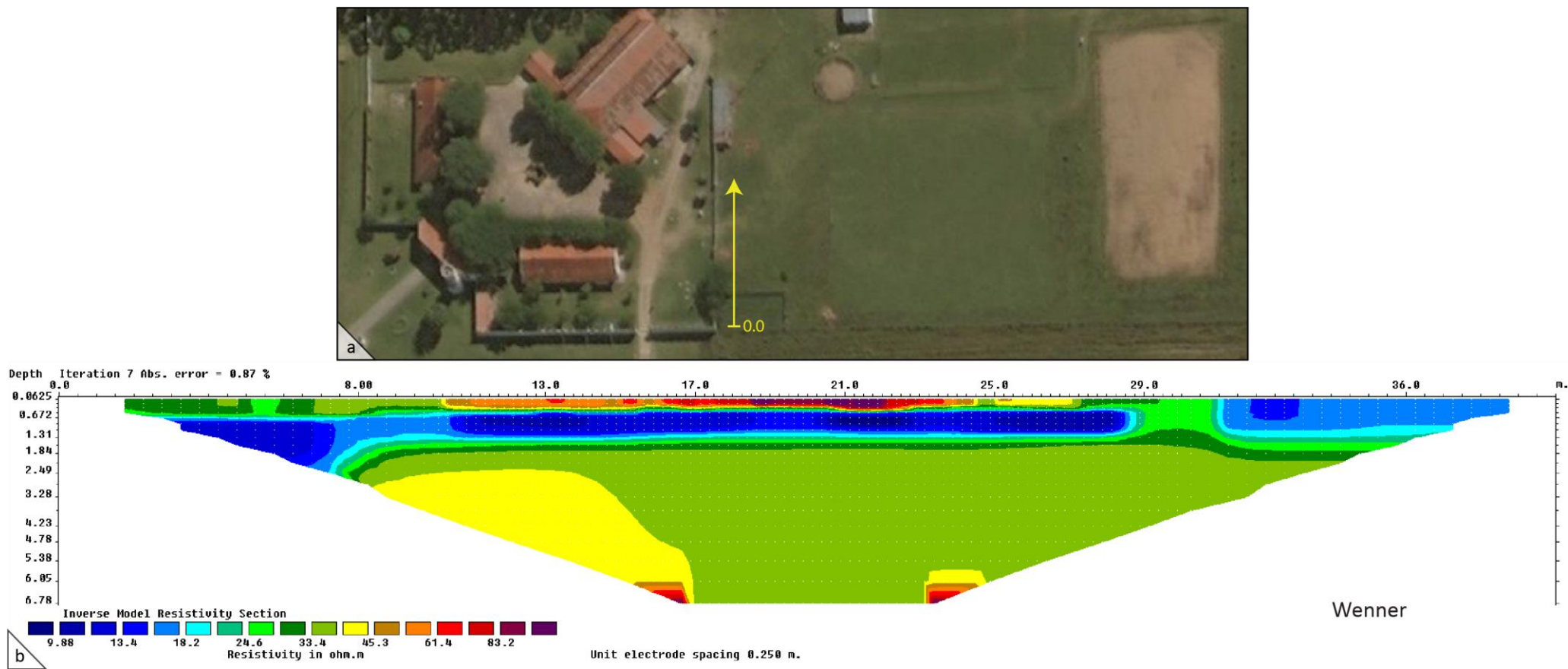


Figura 23. a. Ubicación de la Línea 2. b. Resultado de la tomografía mediante el método Wenner.

Un primer nivel de bajo espesor presenta resistividades altas y se localiza en la zona central del tendido, pudiendo estar vinculado con algún relleno de arena o pedregullo.

El segundo nivel se caracteriza por presentar valores de resistividad entre 5 y 18  $\Omega\text{m}$ , pudiendo corresponder con arcillas/limos saturados. Tanto en la Línea 1 como en la 2, ésta electrofacie presenta una potencia de 1 m aproximadamente cuya base se encuentra entre 1,5 a 1,6 m de profundidad.

El tercer nivel presenta resistividades en el entorno de los 46  $\Omega\text{m}$  alcanzando valores cercanos a los 33  $\Omega\text{m}$  en las zonas más conductivas.

En el caso de los perfiles de las líneas 5 y 6 (Figuras 24 y 25 respectivamente), se observa un primer metro (o metro y medio) de resistividades relativamente altas. Los tendidos eléctricos correspondientes se ubicaron al costado de la Ruta n° 6 y del camino vecinal respectivamente. En campo se puede observar que próximo a las vías de tránsito se desarrollan suaves lomadas compuestas de arena fina a gruesa. Este material puede corresponder con aquél utilizado para la realización de la caminería (material de relleno). Subyacentemente, se registra un nivel de aproximadamente 4 m de materiales bastante conductivos; tanto para el método Wenner como para el Dipolo - Dipolo. Los valores de resistividades asociadas están en el rango 6-17  $\Omega\text{m}$ . Para Dipolo – Dipolo, con el cual se alcanzó mayor profundidad, se distingue un nivel subyacente a aquél de resistividades bajas con valores que andan por encima de los 25  $\Omega\text{m}$ .

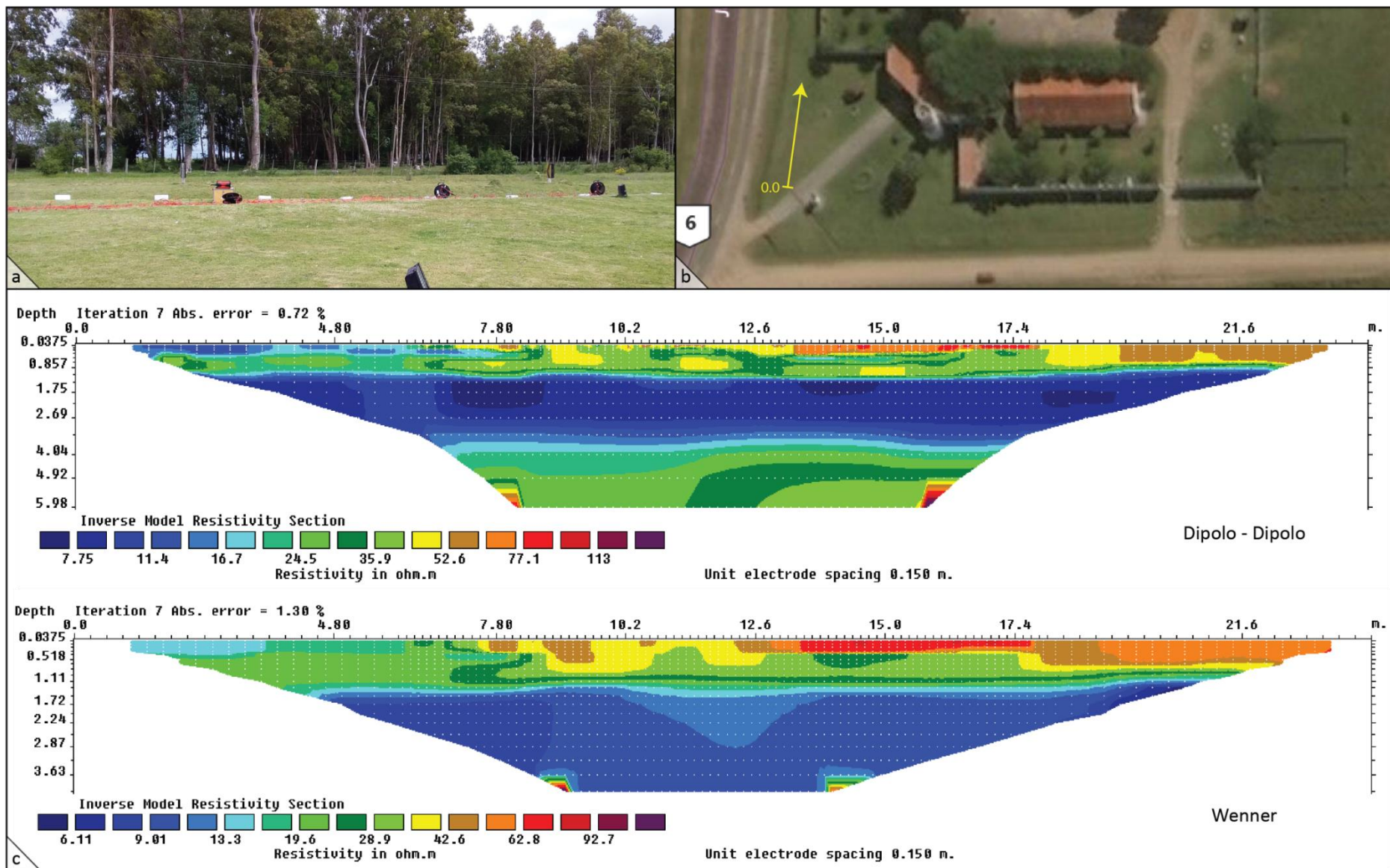


Figura 24. Ubicación (a, b) de la Línea 5 y los resultados obtenidos (c) mediante Dipolo – Dipolo y Wenner.

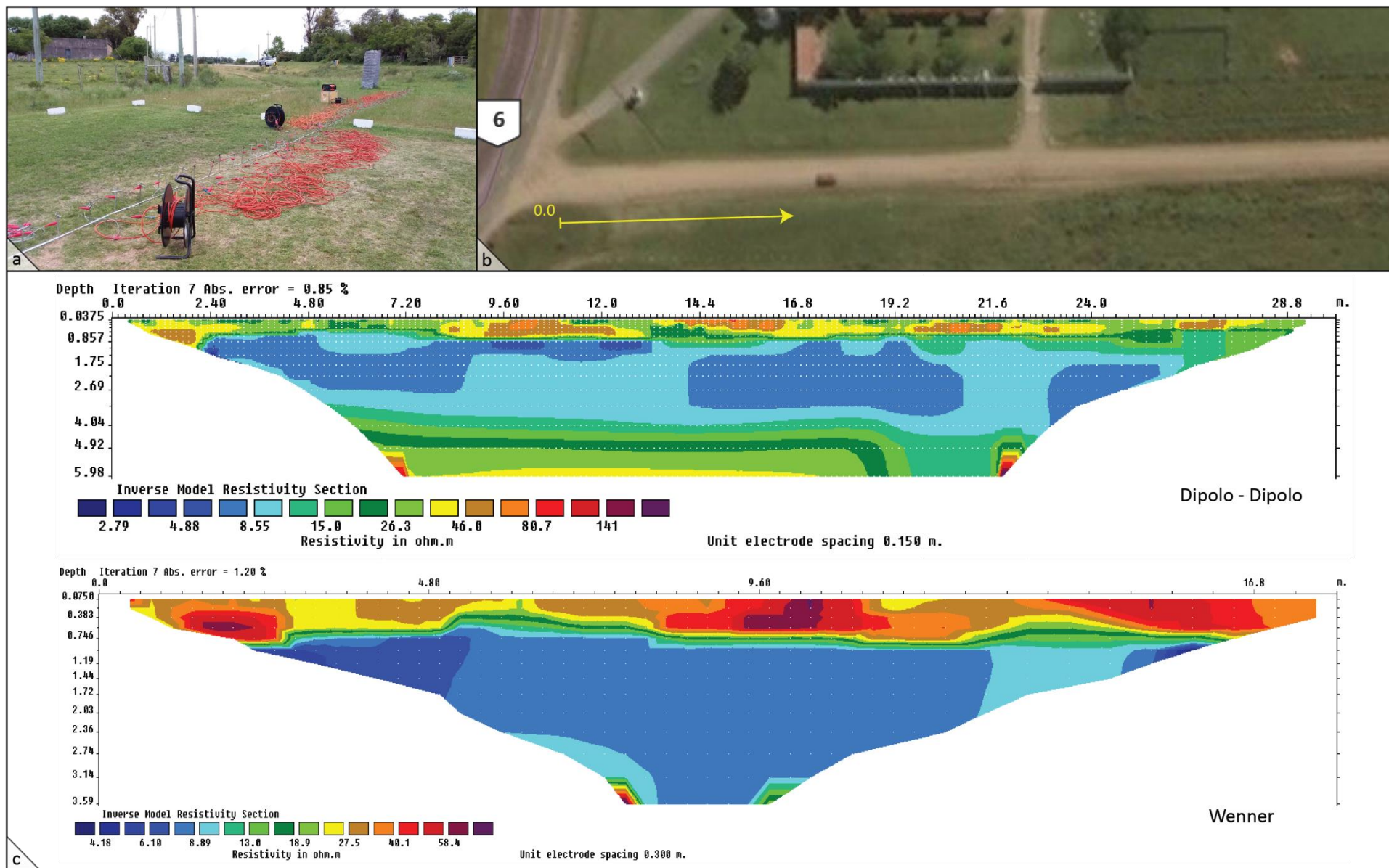


Figura 25. Ubicación de la Línea 6 (a, b) y resultados de la tomografía mediante Dipolo – Dipolo y Wenner.

Para el análisis a mayor profundidad, consideramos los resultados de la Línea 7 (Figura 26) donde se alcanzó un máximo de 24 m (mediante Wenner) y 45 m (mediante Dipolo - Dipolo). Ambos resultados fueron similares, evidenciando un subsuelo con un primer nivel de bajas resistividades (valores menores de  $10 \Omega\text{m}$ ) con un contacto inferior bastante marcado y un aumento gradual de la resistividad hasta alcanzar mayor homogeneidad con valores de entre 100 y  $160 \Omega\text{m}$  (Figura 26c - Wenner). En Dipolo – Dipolo esa gradualidad no es tan evidente aunque es de destacar la mayor profundidad alcanzada, lo cual está vinculado a una pérdida de resolución en niveles más superficiales. Además, este método presenta un diagrama de sensibilidad que indica una increíble disminución en resolución a grandes profundidades debido a la pérdida en la "fuerza" de la señal (Loke 1999, 2003; Reynolds 2011).

Es de destacar también las dos anomalías de alta resistividad ubicadas en los extremos inferiores de la tomografía en Wenner (Figura 26). Anomalías similares se generaron en las líneas 2, 4, 5 y 6 (Figuras 23, 12, 24 y 25) y son consecuencia de la presencia de ruido de fondo. Esto es conocido como Error de Borde, de modo que dichos valores son inciertos.

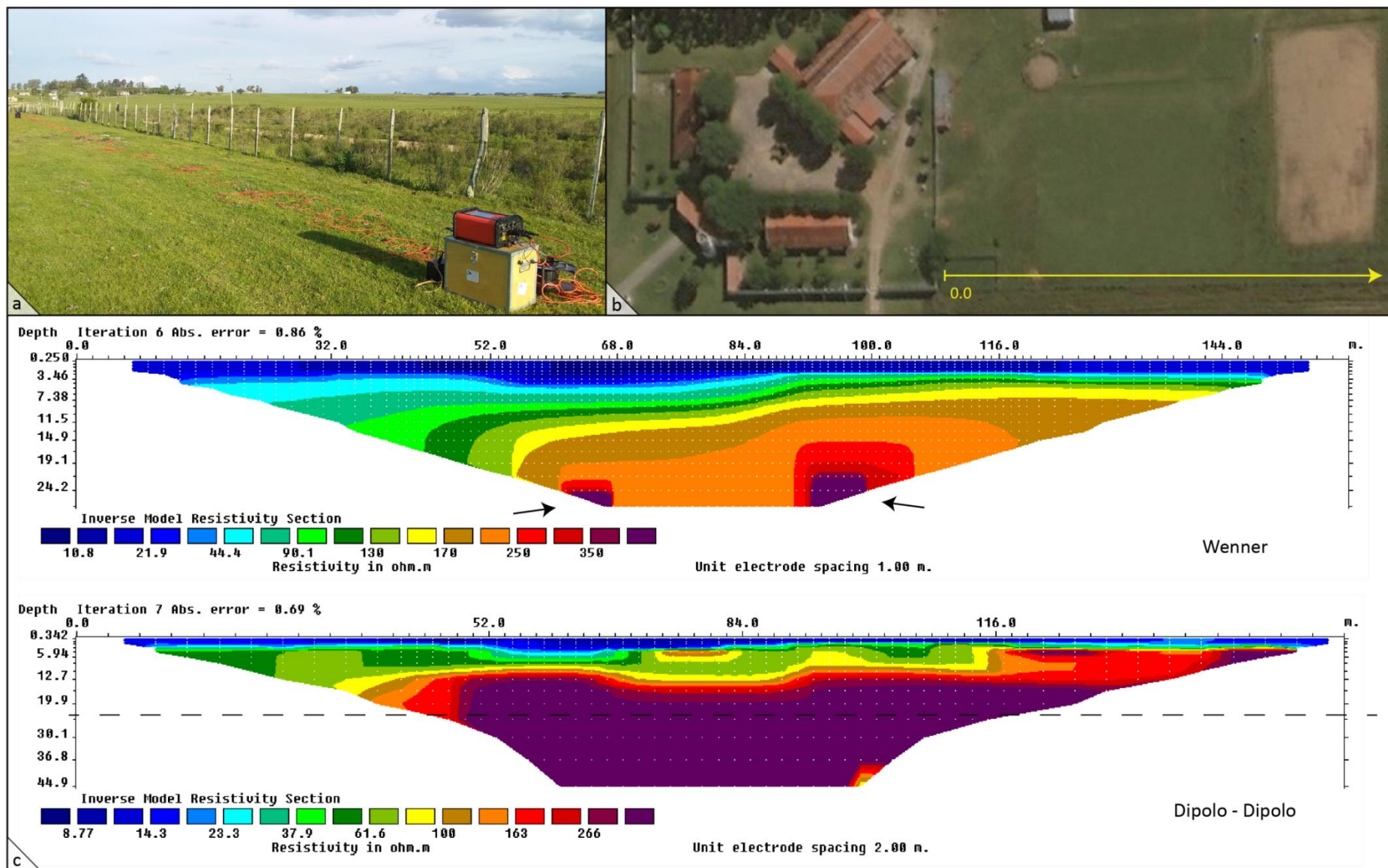
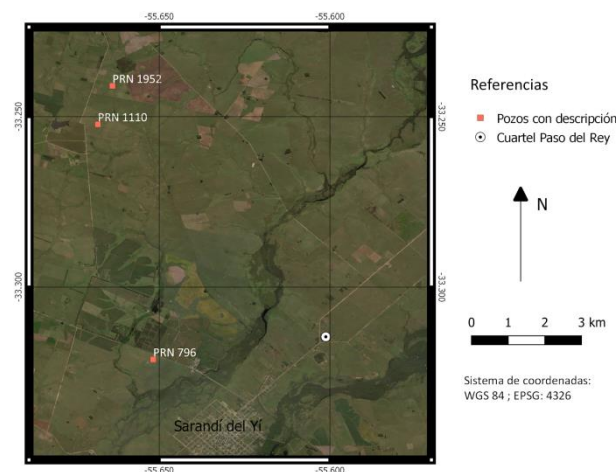


Figura 26. Ubicación de la Línea 7 (a, b). c. Resultados obtenidos mediante Wenner y Dipolo – Dipolo. La línea discontinua en c señala la relación en profundidad máxima alcanzada por ambos métodos (24 m) y se indica en Wenner el efecto de Error de Borde.

### (9.3.1) Correlación con datos directos

Los afloramientos en la zona son muy escasos, sin embargo, pequeñas expresiones superficiales de un granito rosado se pueden encontrar dentro de un radio de 3 km. Por lo tanto, la posibilidad de que los depósitos sedimentarios devónicos se extiendan hasta estas latitudes es muy escasa. Sin embargo, para hacer una afirmación a este respecto es necesario datos directos. Cuando se trabaja con métodos indirectos hay que tener presente que lo único que el resultado revela son cambios en alguna propiedad, lo cual, no implica necesariamente un cambio litológico. Es por esto que comúnmente, las tomografías de este tipo suelen ir acompañadas de perfiles geológicos expuestos, pozos, y/o la utilización de una segunda o incluso tercera técnica indirecta de modo de poder hacer correlaciones y validar los métodos utilizados.

Información geológica del subsuelo se encuentra en descripciones de algunos pozos de agua registrados en la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE, Figura 27). Considerando éstos y la geología de la zona, es muy probable que los resultados obtenidos estén relacionados con los diferentes estados de alteración y fracturamiento del basamento. La información disponible señala que, en la ciudad de Sarandí del Yí, el basamento alterado se puede encontrar a partir de los 3 m de profundidad cubierto por un nivel de arcilla y arena. Además, el basamento fresco, aunque fracturado, se puede encontrar a partir de los 6 a 12 m (Tabla 4). Según (Reynolds 2011), el granito en buen estado presenta un rango de valores de resistividades entre  $300 - 1.3 \times 10^6 \Omega m$  y cuando se encuentra meteorizado presenta un rango entre los 30-500  $\Omega m$ , lo cual concuerda con los valores obtenidos.



**Figura 27.** Ubicación de las perforaciones registradas en Dinamige cercanas a la zona de estudio.

**Tabla 4.** Descripción de pozos próximos a la ciudad de Sarandí del Yí. Datos extraídos de la base de información pública de la Dirección Nacional de Minería y Geología.

Identificador	PRN 796	Profundidad (m)	PRN 1952	Profundidad (m)	PRN 1110	Profundidad (m)
Base Lito 1	Suelo	1	Suelo	1	Suelo	1
Base Lito 2	Arcilla parda arenosa	3	Arcilla parda con arena gruesa	3	Granito rosado y gris muy oscuro	65
Base Lito 3	Granito rosado muy alterado	6	Granito rosado bt. muy alterado	12		
Base Lito 4	Granito rosado fracturado con agua	20	Granito rosado fresco con fracturas	22		
Base Lito 5	Granito gris muy duro	30	Granito rosado bt. fresco	35		
Base Lito 6	Granito gris alterado, con aportes	38	Granito rosado fracturado, con aportes	45		
Nivel Estático		2		3		
Nivel Dinámico		18		35		
Coordenadas	x: 625489,55 y: 6312292,54		x: 624492,18 y: 6321202,32		x: 624077,96 y: 6319957,29	

Hay que tener presente que no siempre las descripciones de pozos presentados a la DINAMIGE son del todo confiables, ya que son pocas las veces en las que hay un geólogo que rectifique la descripción. Además, durante la elaboración de pozos de agua, el *cutting* extraído puede no corresponder a las profundidades mencionadas. De todas formas, a grandes rasgos, es información útil.

Por otro lado, teniendo en cuenta que a pocos kilómetros se encuentra una zona de cizalla de gran porte, el basamento en esta región podría tratarse de rocas miloníticas, las cuales suelen presentar resistividades relativamente bajas.

### (9.3) Discusión de los Métodos

#### (9.3.1) Profundidad

La profundidad máxima que puede alcanzar un método geofísico es uno de los parámetros que más se considera previo al estudio en campo. Los dos métodos utilizados en este estudio presentan herramientas para poder adecuarse a diferentes necesidades. En el caso del Georadar, los factores que más influyen son la frecuencia central de la antena y la permitividad del subsuelo. En el caso de la Tomografía eléctrica, la distancia entre los electrodos potenciales y de corriente es el principal factor, aunque Barker (1989) plantea



que, si existe un nivel muy conductor, generará una disminución en la profundidad de investigación. Sin embargo, la mayoría de los autores, hacen énfasis en la dependencia de la configuración electródica.

En el presente estudio, con el método Dipolo – Dipolo se alcanzaron mayores profundidades que Wenner excepto en dos líneas (1 y 4) donde las máximas profundidades fueron las mismas (Tabla 5). Una observación respecto a esto último es que, en particular, estas dos líneas fueron las únicas con un arreglo electródico en base a dos rollos de cable, es decir 41 electrodos.

**Tabla 5.** Profundidades, en metros, alcanzadas por los métodos Wenner y Dipolo – Dipolo (D-D). En negrita se señalan las profundidades mayores para cada línea.

Método	Línea 1	Línea 3	Línea 4	Línea 5	Línea 6	Línea 7
Wenner	3,28	4,09	2,62	4,09	3,59	26,2
D-D	3,28	<b>5,98</b>	2,62	<b>5,89</b>	<b>5,98</b>	<b>44,2</b>

La elección del dispositivo electródico es de gran importancia para la identificación de cuerpos enterrados. Los diferentes arreglos electródicos resultan ser más o menos eficientes para determinados tipos de prospecciones (Loke 1999, Sasaki 1992). Esta eficiencia se ve condicionada principalmente por la profundidad efectiva de investigación (Edwards 1997) y los patrones de sensibilidad de cada método. Como se observa en las presentes tomografías realizadas, los resultados pueden variar significativamente.

En cuanto al GPR, en el presente trabajo, las permitividades impuestas en los radargramas son especulaciones generadas en base a los resultados de resistividad y la estimación del tipo de materiales que se encuentran en subsuperficie, por lo que la fiabilidad en las escalas de profundidad que se visualizan en las imágenes es baja.

### (9.3.2) Hipérbolas en Georadar

Un método común para estimar si una anomalía corresponde con el objeto prospectado es analizar la forma y dimensiones de la hipérbola (Windsor 2005). Esta característica se encuentra determinada por los siguientes factores:

- Tamaño del objeto enterrado (mayor tamaño, mayor apertura).
- Profundidad del objeto reflector (mayor profundidad, mayor apertura).
- Velocidad de las ondas electromagnéticas en el medio (mayor velocidad, mayor apertura).
- Orientación de la línea de medida respecto a la dirección de la estructura enterrada (a mayor transversalidad, mejor definida será la hipérbola).

Debido a esto, en este trabajo resulta dificultosa la determinación de la geometría de los objetos reflectores. Otro parámetro que se utiliza en casos donde la amplitud de la señal se encuentra fuertemente atenuada es analizar la "fase instantánea" según la transformada de Hilbert (Zheng et al. 2016; Park et al. 2018), lo cual permite resaltar las diferencias en las propiedades electromagnéticas del medio (permitividad eléctrica principalmente)

### (9.3.3) Eficiencia del método

La presencia de cuerpos de no interés puede generar respuestas que desorientan al investigador si no se cuenta con una precisa ubicación de cuerpos antropogénicos enterrados. En este caso, los árboles en la tomografía eléctrica o el objeto no identificado que genera una respuesta vertical en los radargramas funcionan como ejemplo. La presencia de obstáculos que dificulten medición óptima es otro factor a tener en cuenta. En el presente trabajo, la supresión de una serie de electrodos en la Línea 4 de tomografía eléctrica genera mayor porcentaje de error en los resultados obtenidos y perjudica la representación de las anomalías presentes. Por otro lado, contar con GPS de precisión es imprescindible para este tipo de investigaciones: la ubicación precisa de los objetos y de las líneas de medida permite correlacionar los datos entre sí. Es así que la efectividad de cada método depende de diferentes factores (Tabla 6).

**Tabla 6.** Diagrama de factores que influyen en la efectividad de una tarea de campo utilizando Tomografía eléctrica y/o Georadar.

Tiempo	Instalación
	Medición
	Tiempo real de trabajo
	Horario de luz Ida y vuelta al área de estudio
Estrategia	Ubicación de las líneas de medida
	Relación Espacio/Resolución
	Correlación con otra técnica
	Consideración de las hipótesis
Condiciones de trabajo	Cantidad de personas
	Disponibilidad de agua
	Dureza del suelo
	Obstáculos superficiales
	Fuentes de ruido
	Contar con GPS de precisión
	Imprevistos

La estrategia de prospección es clave. Espacios sin datos son inherentes a la tomografía eléctrica (forma cónica del perfil); la no detección o la detección parcial de un cuerpo enterrado debido a esta condición pudo haber sucedido en esta investigación (caso de la anomalía TA<sub>1</sub> en la Línea 3).

Finalmente, durante la realización de esta investigación se pudo observar que, un factor determinante en la eficiencia de una técnica geofísica respecto a los objetivos de la investigación, es el tiempo. La correcta evaluación del tiempo real de trabajo y aquél que es inherente a la técnica utilizada es de gran relevancia en la estimación del tiempo necesario para cumplir con los objetivos. Esto se aplica principalmente en el caso de la Tomografía eléctrica ya que es una técnica que puede llegar a requerir mucho tiempo para completar

una única medida. Entonces, si a este factor se le agrega una incorrecta planificación de las características del tendido eléctrico, por ejemplo, el espaciado entre electrodos o su localización, el tiempo que podría llegar a requerirse para obtener un buen resultado se multiplica. A modo de visualización, en la Tabla 7 se expone la duración de las medidas con tomografía eléctrica para cada dispositivo electródico en esta investigación.

**Tabla 7.** Tiempo de medida para cada tendido y cada método. Información extraída del archivo *.db* generado por el equipo de medida.

<b>Tendido</b>	<b>Wenner</b>	<b>Dipolo-Dipolo</b>	<b>Schlumberger</b>	<b>Tiempo Total</b>
<b>Línea 1</b>	23	15	48	1h 26
<b>Línea 2</b>	58	-	-	
<b>Línea 3</b>	47	45	-	1h 32
<b>Línea 4</b>	13	15	-	
<b>Línea 5</b>	?	44	-	
<b>Línea 6</b>	27	1h 46	-	2h 13
<b>Línea 7</b>	38	47	-	1h 25
	<b>Gradient</b>			
<b>Arreglo 3D</b>	8			

## (10) Conclusiones

En cuanto a la ubicación del túnel, existen confusiones en los resultados obtenidos. Esto se vincula con lo siguiente: falta de conocimiento de objetos enterrados (tuberías, cables de corriente, saneamiento), no contar con información de velocidad de ondas electromagnéticas en el subsuelo, proceso metodológico donde la precisión de las líneas de medida genera un error equivalente a la dimensión de corte del objeto a prospectar y la no verificación de las anomalías mediante métodos directos (etapa posterior a la identificación de anomalías). De todas formas se pudo arribar a las siguientes conclusiones:

a. Se identificaron anomalías concentradas en la zona central del Sector A (TA<sub>1</sub>, TA<sub>2</sub>, GA<sub>1</sub>, GA<sub>2</sub>), consistentes con la presencia del túnel o cavidad (Figura 28).



**Figura 28.** Ubicación de las diferentes anomalías identificadas.

b. Se estima que el subsuelo del *Cuartel Paso del Rey* es equivalente a aquél que puede encontrarse en la ciudad de Sarandí del Yí. Estaría compuesto por un nivel de arcillas, un potente nivel de basamento alterado, seguido de un basamento fresco a una profundidad de 7-11 m con diferentes grados de fracturamiento que permite ver variaciones en los valores de resistividad.

c. En cuanto a la metodología, la utilización del Georadar previo a la tomografía podría haber incrementado la eficiencia de la prospección.

d. Los resultados obtenidos con las dos técnicas geofísicas verificaron la importancia de contar con dos fuentes de datos. La anomalía TA<sub>2</sub> es la fiel candidata a representar el túnel, sin embargo, su baja correlación con los radargramas generados, y la aparición de nuevas anomalías permite la discusión de los datos obtenidos. A su vez, la gran cantidad de factores que condicionan los resultados en georadar exigen el uso de "elementos guía" para poder realizar análisis detallados de los datos, por ejemplo, estudios de curvatura de hipérbolas en georadar para la estimación de las dimensiones de los reflectores.

e. Considerando que fueron identificadas más estructuras de las esperadas, tanto la tomografía eléctrica como el georadar mostraron potencial para la detección de estructuras subterráneas.

Este trabajo constituye el puntapié inicial para la realización de estudios de este tipo en el país. En Uruguay se encuentran antiguas galerías mineras cuya identificación podría cumplir propósitos desde turísticos, hasta un método a considerar en un inicio en la exploración mineral. Por otro lado, con una buena distribución de líneas de medida podrían llegar a identificarse columnas no visibles en las Grutas del Palacio, hoy reconocido como geoparque nacional (área protegida); o identificar el límite entre la roca no erosionada y la zona donde se desarrollan tales columnas.

## (11) Bibliografía

- ABEM, A. (2012). *Terrameter LS Instruction Manual*.  
Advanced Geosciences, Inc, (2007). *Case and void detection*, accessed January 15, 2010 from <https://www.agiusa.com/cave-detection-testing-industry%E2%80%99s-first-electrical-resistivity-imaging-instrument>
- Amini, A., & Ramazi, H. (2017). *CRSP, numerical results for an electrical resistivity array to detect underground cavities*. Open Geosciences, 9(1), 13-23.
- Annan, A. P. (2004). *Ground penetrating radar applications, principles, procedures*. Mississauga, Canada: Sensors and Software.
- Barker, R. D. (1989). *Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays*. Geophysics, 54(8), 1031-1037.
- Bossi, J. (1966). *Geología del Uruguay: Colección Ciencias, 2*. Universidad de la República, Departamento de Publicaciones, 1-164.
- Bossi J, Preciozzi F, Campal N (1993) *Predevoniano del Uruguay*. Parte 1: Terreno Piedra Alta. DINAMIGE, Montevideo, pp 1–50
- Bossi, J., Ferrando, L., Fernández, A., Elizalde, G., Morales, H., Ledesma, J., Caraballo, E., Medina, E., Ford, I. & Montaña, J. (1975). *Carta geológica del Uruguay: Escala 1/1.000. 000*. Montevideo: MAP. 32p.
- Bossi J, & Campal N (1992). *Magmatismo y tectónica transcurrente durante el Paleozoico inferior del Uruguay*. In: Gutiérrez J, Saavedra J, Rábano I (eds) *Paleozoico Inferior de Ibero-América*. Universidad de Extremadura, Alicante, pp 343–356
- Bossi, J., & Navarro, R. (1988). *Geología del Uruguay*. 2 tomos. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República. Montevideo. Uruguay.
- Dalla Salda, L., Bossi, J., & Cingolani, C. (1988). *The Río de la Plata cratonic region of southwestern Gondwanaland*. Episodes, 11(4), 263-269.
- Das, P., Pal, S. K., Mohanty, P. R., Priyam, P., Bharti, A. K., & Kumar, R. (2017). *Abandoned mine galleries detection using electrical resistivity tomography method over Jharia coal field, India*. Journal of the Geological Society of India, 90(2), 169-174.
- Edwards, L. S. (1977). *A modified pseudosection for resistivity and IP*. Geophysics, 42(5), 1020-1036.
- Evjen, H. M. (1938). *Depth factors and resolving power of electrical measurements*. Geophysics, 3(2), 78-95.
- Geotomo, S. (2010). *Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the least-squares method*.

Hidalgo, A. L., Loke, M. H., Fanton, G. O., & Rubí, E. C. (2010). *Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía Eléctrica 2D y 3D)*.

Lambert, R. (1941). *Estado actual sobre los conocimientos geológicos de la R. O. del Uruguay*, *ibid*, Bol. Nº 29, Montevideo.

Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*. *Geophysical prospecting*, 44(1), 131-152.

Loke, M. H. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to*, 2.

Loke, M. H., & Dahlin, T. (2002). *A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion*. *Journal of applied geophysics*, 49(3), 149-162.

Loke, M. H. (2003). *Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using the least-squares method*. Geotomo Software. Manual.

Loureiro, J., Sánchez, L., Pérez Cerdán, F., Spoturno, J. (2017). *Mapa Geológico del Uruguay. Visualizador Geominero. DINAMIGE*.

Maillol, J. M., Seguin, M. K., Gupta, O. P., Akhauri, H. M., & Sen, N. (1999). *Electrical resistivity tomography survey for delineating uncharted mine galleries in West Bengal, India*. *Geophysical prospecting*, 47(2), 103-116.

Martinez, A., & Brynes, A. P. (2001). *Modeling dielectric-constant values of geologic materials: An aid to ground-penetrating radar data collection and interpretation (Vol. 247)*. Lawrence, Kansas: Kansas Geological Survey.

Martinez-Lopez, J., Rey, J., Duenas, J., Hidalgo, C., & Benavente, J. (2013). *Electrical tomography applied to the detection of subsurface cavities*. *Journal of Cave & Karst Studies*, 75(1).

Martínez-López, J., Rey, J., Sandoval, S., & Rodríguez, M. (2007). *La tomografía eléctrica: una herramienta para la detección de huecos mineros (concesión de Arrayanes, Linares-Jaén)*.

Orlando, L. (2013). *GPR to constrain ERT data inversion in cavity searching: Theoretical and practical applications in archeology*. *Journal of Applied Geophysics*, 89, 35-47.

Oyhantçabal, P., Spoturno J, Loureiro J (2007) *Caracterización geológica de las rocas Paleoproterozoicas de la región Centro-Sur del Uruguay (Terreno Piedra Alta—Cratón Del Río De La Plata)*. In: *Actas V Congreso Uruguayo de Geología*. CD-ROM.

Oyhantçabal, P., Siegesmund, S., & Wemmer, K. (2011). *The Río de la Plata Craton: a review of units, boundaries, ages and isotopic signature*. *International Journal of Earth Sciences*, 100(2-3), 201-220.



Park, B., Kim, J., Lee, J., Kang, M. S., & An, Y. K. (2018). *Underground object classification for urban roads using instantaneous phase analysis of ground-penetrating radar (GPR) data*. *Remote Sensing*, 10(9), 1417.

Preciozzi, F., Spoturno, J., & Heinzen, W. (1979). *Carta geo-estructural del Uruguay*, escala 1: 2.000. 000. Instituto Geológico Ing. Terra Arocena, Montevideo, 62.

Preciozzi Porta, F., Pioppo, J. S., Marziotto, W. H., & Kempa, P. R. (1985). *Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a la escala 1: 500.000*. Ministerio de Industria y Energía, Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo.

Preciozzi, F., Sanchez, B., Oyhantcabal, P., Pecoits, E., Aubet, N., Peel, E., & Basei, M. (2005) *The land Piedra Alta: A geotectonic unit in the juvenile Paleoproterozoic craton del Rio de la Plata (Uruguay)*. XII Congreso Latinoamericano de Geología

Pueyo Anchuela, Ó., Zamora Iranzo, S. A., & Pocoví Juan, A. (2005). *Aplicación de la prospección geofísica por georradar (GPR) a la delimitación y caracterización de estructuras arqueológicas. Ejemplo de las ruinas del convento agustino de Fraga (Huesca)*.

Putiška, R., Nikolaj, M., Dostál, I., & Kušnirák, D. (2012). *Determination of cavities using electrical resistivity tomography*. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 42(2), 201-211.

Rapela, C. W., Pankhurst, R. J., Casquet, C., Fanning, C. M., Baldo, E. G., González-Casado, J. M., Galindo, C. & Dahlquist, J. (2007). *The Río de la Plata craton and the assembly of SW Gondwana*. *Earth-Science Reviews*, 83(1-2), 49-82.

Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.

Riddle, G. I., Hickey, C. J., & Schmitt, D. R. (2010). *Subsurface tunnel detection using electrical resistivity tomography and seismic refraction tomography: a case study*. In 23rd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.

Robinson, M., Bristow, C., McKinley, J., & Ruffell, A. (2013). *Ground penetrating radar*. *Geomorphological Techniques*, Part, 1, 2047-0371.

Roy, A., & Apparao, A. (1971). *Depth of investigation in direct current methods*. *Geophysics*, 36(5), 943-959.

Sanchez Bettucci, L., Peel, E., & Oyhantçabal, P. (2010). *Precambrian geotectonic units of the Río de La Plata craton*. *International Geology Review*, 52(1), 32-50.

Sasaki, Y. (1992). *Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation*. *Geophysical prospecting*, 40(4), 453-463.

Schmaltz, E., & Uhlemann, S. (2016, April). *Estimation of tree root distribution using electrical resistivity tomography*. In *EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 18)*.

Veroslavsky, G., Fulfaro, V., & de Santa Ana, H. (2006). *El Devónico en Uruguay: estratigrafía, correlación geológica y recursos minerales*. Cuencas Sedimentarias del Uruguay, Geología, paleontología y recursos naturales–Paleozoico. DIRAC, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, 107-132.

Weinzettel, P., Varni, M., Dietrich, S., & Usunoff, E. (2009). *Evaluación de tres dispositivos de tomografía eléctrica para la identificación de horizontes petrocálcicos en el suelo*. Ciencia del suelo, 27(1), 135-146.

Windsor, C., Capineri, L., Falorni, P., Matucci, S., & Borgioli, G. (2005). *The estimation of buried pipe diameters using ground penetrating radar*. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 47(7), 394-399.

Zheng, L., Liu, Z., Wang, G., & Zhang, Z. (2016, June). *Research on application of Hilbert transform in radar signal simulation*. In 7th International Conference on Environment and Engineering Geophysics & Summit Forum of Chinese Academy of Engineering on Engineering Science and Technology. Atlantis Press.

## ANEXO I - El Cuartel

El cuartel militar *Paso del Rey* ubicado sobre el kilómetro 210 de la Ruta 6 en el departamento de Durazno (Uruguay) fue declarado Monumento Histórico Nacional el 13 de diciembre del 2001 por decreto del Poder Ejecutivo. La historia de este cuartel, inicia en 1770 a partir de la instalación de una guardia militar sobre el río Yí. Es en 1908 que bajo el mando del Teniente Coronel e Ingeniero Geógrafo José Chiappara, se construyen tres cuarteles de tipo "Económico": uno en Trinidad, otro en Durazno y el referente.

Dentro de este cuartel se encuentran los museos "Batalla del Río de la Plata" y "Museo de la sub Unidad" los cuales muestran una colección de materiales históricos que reflejan la historia vivida por el cuartel. Se destaca la época de estadía de 96 tripulantes de la embarcación alemana *Graf Spee* y buque auxiliar Tacoma que aparcaron en el puerto de Montevideo para la reparación de los daños sufridos por el *Graf Spee* en la Batalla del Río de la Plata durante la Segunda Guerra Mundial frente a buques ingleses. Así, el museo expone entre otros objetos de la época, armamento, uniformes, maquetas y fotografías. También, se aborda la época en la que el cuartel funcionó como Aeroclub local y repasa la trayectoria del cuartel con el pasaje de los diferentes grupos militares.

Desde 1999, a partir de la iniciativa propuesta por el "Equipo de Desarrollo Local", se busca la recuperación, mantenimiento y rescate de los elementos históricos de la ciudad de Sarandí del Yí para apoyar su desarrollo. Dentro de este plan, cae el cuartel *Paso del Rey*, el cual desde la fecha ha sufrido diversas atenciones edilicias.



**Figura I.** Parte de la exposición del museo "Museo de la sub Unidad" y "Batalla del Río de la Plata". **a.** Objetos encontrados dentro del túnel. **b.** Maqueta del buque alemán *Graf Spee*.

## ANEXO II – Factor Geométrico

Como se mencionó en la sección 4.3, el cálculo de resistividad para un valor medido de caída de potencial entre los electrodos potenciales de un tendido eléctrico, se lo realiza considerando que el subsuelo es equivalente a un semiespacio homogéneo.

El circuito determinado por el electrodo de corriente A y el electrodo de corriente B generan un modelo de campo eléctrico similar a aquel de dos cargas puntuales de polaridades inversas (Reynolds 2011). De esta forma, para cualquier punto P del espacio, el potencial resultante es igual a la suma del potencial generado por A más el generado por B.

El Voltímetro interno que presenta el tomógrafo, medirá la cantidad de carga eléctrica positiva que entra por el primer electrodo potencial y luego medirá la cantidad de carga negativa en el segundo electrodo potencial, dando como resultado la diferencia de potencial eléctrico.

El potencial generado por una carga puntual Q en un punto P ubicado a una distancia r de Q, está determinado por la siguiente ecuación:

$$\frac{\delta V}{\delta r} = -\rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{ae1})$$

$$V = \int \delta V = - \int \rho \frac{I}{2\pi r^2} dr = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (\text{ae2})$$

Aplicando esto a un arreglo de cuatro electrodos A y B (de corriente) y M y N (potenciales), el potencial en M y N serán:

$$V_{AM} + V_{MB} = \frac{\rho I}{2\pi AM} + \frac{\rho I}{2\pi MB} \quad (\text{ae3})$$

$$V_{AN} + V_{NB} = \frac{\rho I}{2\pi AN} + \frac{\rho I}{2\pi NB} \quad (\text{ae4})$$

Como luego del punto medio entre M y N el gradiente de potencial incrementa en vez de disminuir:

$$V_{AM} + V_{MB} = \frac{\rho I}{2\pi AM} - \frac{\rho I}{2\pi MB} \quad (\text{ae5})$$

$$V_{AN} + V_{NB} = \frac{\rho I}{2\pi AN} - \frac{\rho I}{2\pi NB} \quad (\text{ae6})$$

Entonces, la diferencia de potencial  $V_{MN}$  queda expresada del siguiente modo:

$$V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right] \quad (\text{ae7})$$

$$V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} (K) \quad (\text{ae8})$$

Puede verse más fácilmente en esta última expresión que la caída de potencial entre M y N depende de la distancia entre los electrodos A y B.  $K^{-1}$  representa esta dependencia y se lo conoce como *factor geométrico (k)*. Finalmente, el valor de  $k$  depende del arreglo eléctrico utilizado ya que las relaciones de distancia entre los diferentes electrodos no son las mismas para uno y otro método. Esto implica que para un mismo tendido eléctrico, el valor de  $k$  para Wenner no va a ser el mismo que para Dipolo – Dipolo. En este sentido, considerando además un mismo suelo homogéneo y dos métodos donde  $k_1 > k_2$ , aplicando la expresión **ae7**, se tiene que el voltaje medido para el método con factor geométrico  $k_1$  va a ser menor que para el método con factor geométrico  $k_2$ . Esto resulta en la variación de los valores de resistividad aparente calculados. En la Figura 4 (*sección 4.3*) se desarrolla el cálculo de  $k$  para estos dos métodos inter-electródicos.

## ANEXO III - Metodología de adquisición de datos

En general, las formas de adquisición de datos de resistividad en una tomografía están condicionadas por la flexibilidad del equipo utilizado para alcanzar las resoluciones deseadas: cantidad de electrodos que puede soportar, compatibilidad con diferentes *arrays*, las posibles combinaciones de distancias entre electrodos y el largo total del tendido eléctrico. En el presente trabajo, se contó con el tomógrafo *Terrameter LS* de ABEM, el cual además de ser compatible con diferentes arreglos electródicos (ver secc. 5; ABEM, A. 2012), el usuario puede crear sus propios arreglos. En función de la cantidad de rollos de cables de corriente disponibles (dos o cuatro), se desprenden las posibilidades de trabajar con 41 o 61 electrodos pudiendo trabajar con un máximo de 64 electrodos. La disposición de los electrodos puede realizarse sobre una única línea, pero también, está la posibilidad de generar los perfiles siguiendo la técnica *roll-along*. El *Terrameter LS* también admite una configuración de electrodos para posteriormente realizar inversiones 3D. Estas diferentes metodologías de trabajo le permiten al usuario optimizar esta técnica geofísica a las condiciones del terreno y sus objetivos.

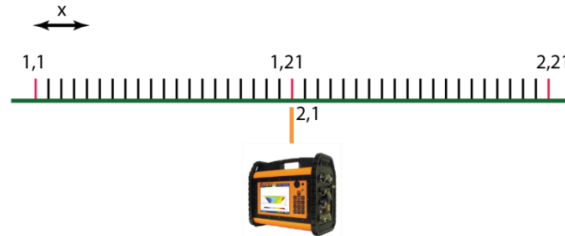
Para que un 50% del flujo de corriente pase de un medio a otro a través de una interfaz ubicada a una profundidad  $z$ , la distancia entre los electrodos de corriente debe ser equivalente a  $2z$  o  $3z$ . Es debido a esto que en tomografía eléctrica se realizan tendidos más largos para alcanzar mayores profundidades. Sin embargo, cuando se realizan tendidos eléctricos tan largos, la mayor separación entre los electrodos provoca pérdida de resolución en superficie ya que la densidad de corriente en esa porción del subsuelo disminuye (secc. 4.3.1). Sin embargo, usando la técnica de *roll-along* es posible cubrir mayores distancias utilizando la distancia entre electrodos necesaria para obtener la resolución deseada a la profundidad deseada.

En este trabajo fue posible poner a prueba las diferentes configuraciones de la técnica y a continuación se describe brevemente cómo llevarla a cabo con el equipo *Terrameter LS*:

- Tomografía con 2 rollos de cables
- Tomografía con 4 rollos de cables
- *Roll-along*
- Arreglo tridimensional

### Tomografía con 2 rollos de cables

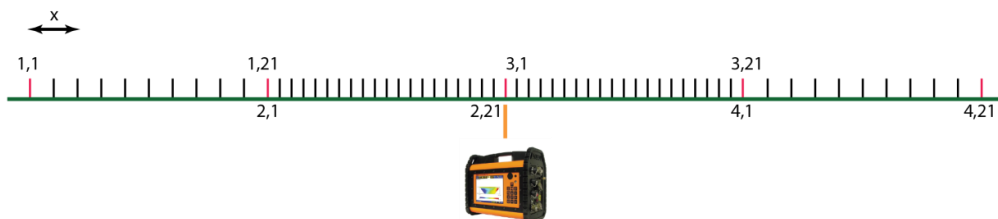
Consiste en la colocación de 41 electrodos en línea donde cada rollo de cable de corriente será conectado a 20 electrodos. El electrodo sobrante será común a ambos cables como se observa en la Figura II. La distancia entre electrodos se mantiene constante a lo largo de todo el tendido.



**Figura II.** Arreglo en línea de 41 electrodos. El electrodo central es compartido por los dos rollos de cable (n° 1,21 y n° 2,1).

### Tomografía con 4 rollos de cables

En esta configuración se hacen uso de 61 electrodos en línea, aunque la distancia entre ellos no se mantiene constante a lo largo de todo el tendido. Los cuatro rollos de cable se extienden de forma consecutiva siguiendo una línea lo más recta posible del mismo modo que en el caso anterior. Serán 41 los electrodos que irán conectados a los cables centrales, del mismo modo que en el caso anterior, mientras que a los cables de los extremos se les conecta 10 electrodos a cada uno sumado al electrodo que tendrán en común con el cable adyacente (Figura III). Para esta metodología, si  $l$  es la distancia entre dos pares de electrodos centrales, los 20 electrodos correspondientes a los cables de los extremos estarán separados a una distancia de  $2l$ . Esto es debido a que el *Terrameter LS* es capaz de trabajar hasta con 64 electrodos, lo cual no sería posible si se trabajara con 20 electrodos por cable ya que sería un total de 81 electrodos. La distancia es de  $2l$  para respetar la configuración que le asigna el usuario al inicio de la campaña, cuando selecciona el espaciado en la dirección  $x$ .



**Figura III.** Arreglo en línea de 61 electrodos. Los tres electrodos centrales son compartidos por los rollos de cables adyacentes.

### **Roll-along**

Como se puede observar en los diferentes resultados de las tomografías, las pseudosecciones obtenidas presentan una forma tipo cónica donde las porciones debajo de los extremos del tendido se encuentran sin datos. Si realizáramos dos perfiles continuos en el espacio siguiendo un rumbo constante, y lo realizáramos con el método convencional (de 2 o 4 rollos) y luego "uniéramos" los resultados, resultaría un espacio sin datos entre ambos perfiles. El objetivo del *roll-along* es poder obtener perfiles largos con buena resolución y sin espacios *sin datos* en el medio. Esta configuración necesita de tres rollos de cables ya que los mismos se irán corriendo alternadamente alargando el perfil en una dirección y sentido dados.

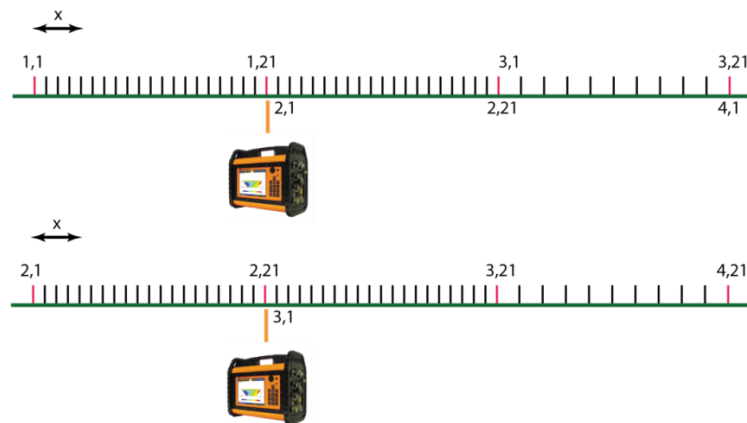
El primer paso es colocar dos rollos con sus electrodos de la misma manera que se explicó en "Tomografía con dos rollos de cable" y un tercer cable con espaciado doble entre electrodo. Una vez obtenidos los datos, se le especifica a la consola de comando del *Terrameter LS* que se va a correr el tendido en una porción. Esto significa que el armado se correrá como se indica en la Figura IV. Una vez que culmina el tiempo de medida se repite el procedimiento hasta que se cubra la distancia requerida.

Algo importante a considerar en este método es el tiempo que requiere. El *roll-along* es una técnica que puede llevar mucho tiempo ya que constantemente se está armando y desarmando el tendido eléctrico. Además, si en la prospección se necesita buena resolución y abarcar grandes espacios, cada "sección" de medida puede ser de corta longitud en comparación con la longitud total que se desea cubrir. Una forma de ahorrar tiempo es en vez de trabajar únicamente con 2 rollos, trabajar con 4; así, mientras el equipo toma las medidas, se preparan las secciones adyacentes y queda armado para la siguiente etapa de medida. Como se puede notar, esto implica que el equipo de trabajo esté continuamente en actividad, por lo que ni bien se ahorra tiempo, se gasta mucha energía.

El factor "energía" del equipo de trabajo puede no ser considerado en un principio como un factor relevante, sin embargo, es importante tenerlo en cuenta a la hora de la planificación de la etapa de prospección junto con el tiempo total con el que se cuenta para realizar el estudio, la cantidad de personal, el área a cubrir, las condiciones del terreno y la resolución necesaria. Todos estos factores son dependientes entre sí, de modo que es necesario



tenerlos presentes para evaluar si esta técnica es realmente la más eficiente para el caso de estudio.



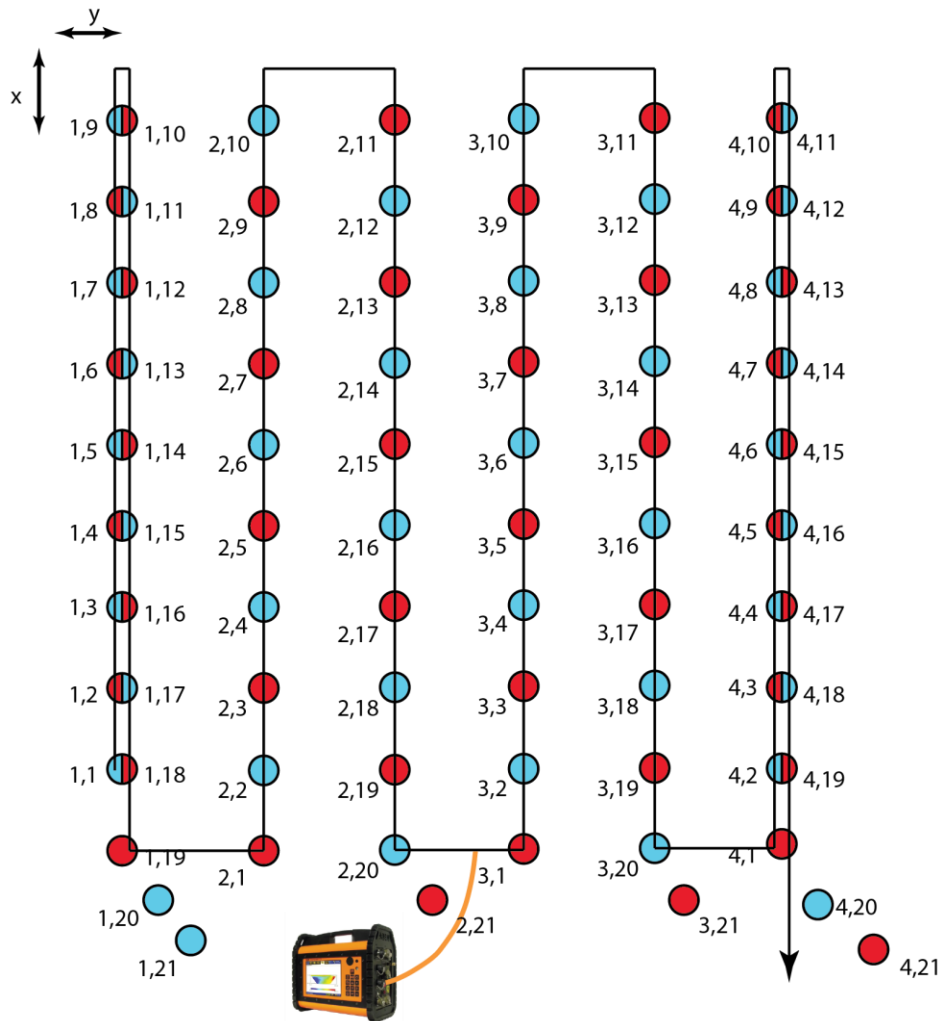
**Figura IV.** Arreglo en línea *roll allong*. Los electrodos centrales son compartidos por los cables adyacentes.

### Arreglo 3D

Hace no mucho tiempo los modelos 3D en tomografía eléctrica consistían en la realización de perfiles paralelos y ortogonales para posteriormente aplicarles métodos de interpolación. Hoy en día, los electrodos se colocan conformando un arreglo diferente: en grilla o en "L" (Barrientos et al. 2015). La configuración en grilla consiste en colocar electrodos en un arreglo ortogonal "x", "y" como se muestra en la Figura V. El espaciado según "x" e "y" puede ser el mismo o ser diferente formando así arreglos cuadrados o rectangulares cuya dimensión es equivalente al área al que se le generará el modelo 3D. El *Terrameter LS* de ABEM admite dos tipos de grilla: de 4x5 o de 10x6 y el *array Gradient* como método electródico. En cuanto a los cables de corriente, éstos tienen un orden determinado que se muestra en la Figura V.

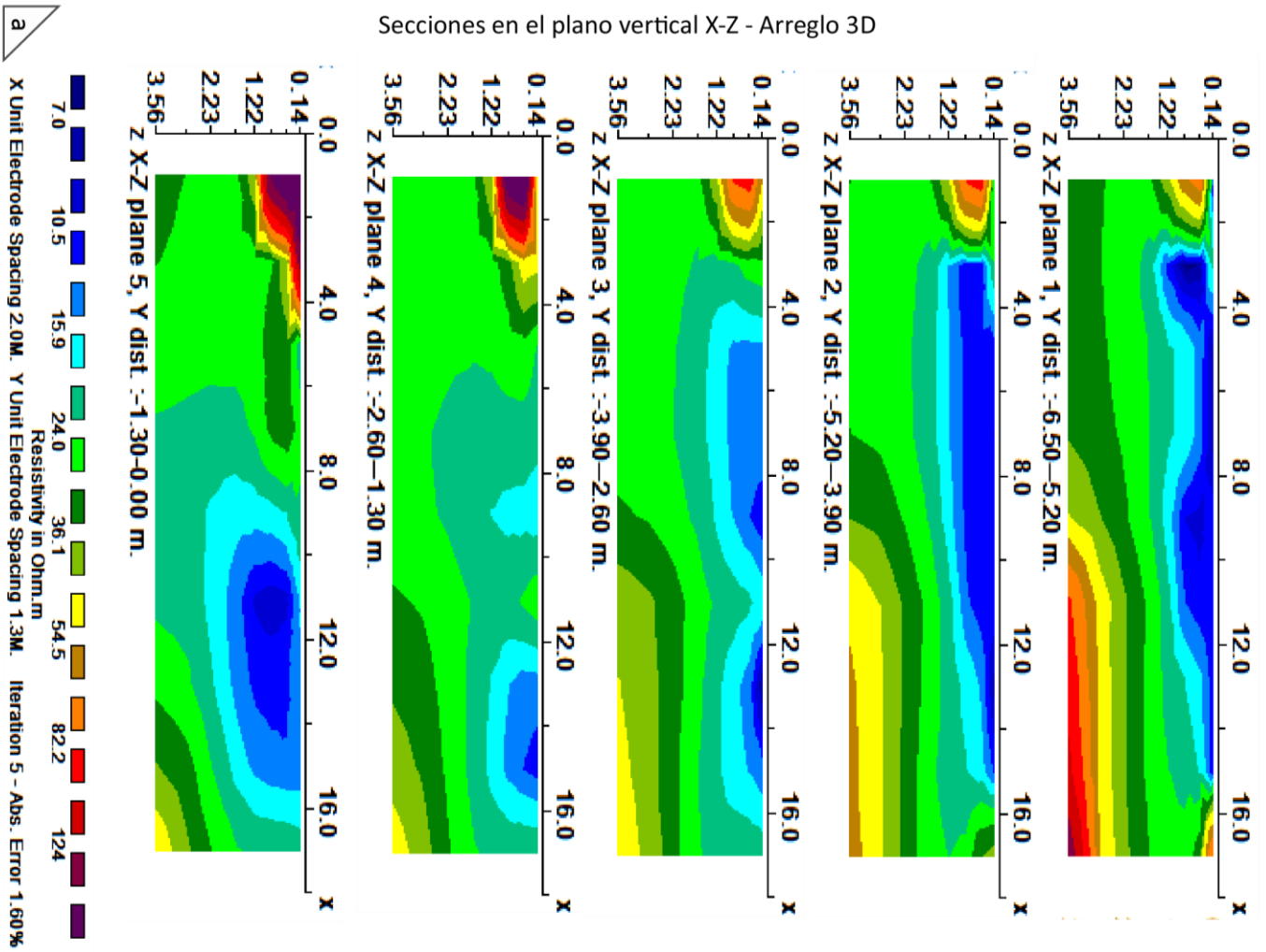
El programa RES3DINV de Geotomo se basa en el método *smoothness-constrained least-squares method* (deGroot-Hedlin & Constable 1990, Sasaki 1992) y un método de optimización *quasi-Newton* (Loke & Barker 1996; Loke & Dahlin 2002). Una primera diferencia con los procesos de inversión 2D es que el modelo del terreno ahora es más complejo. Cuando se trabaja con tomografía 2D se asume que las resistividades cambian a lo largo de un eje "x" y un eje "z" considerando al eje x formando parte del plano horizontal paralelo a la superficie y el eje z ortogonal equivaliendo a la profundidad. Las resistividades según un eje "y" perpendicular al plano "xz" se mantienen constantes. En el caso de las tomografías 3D, se asume que las resistividades pueden cambiar a lo largo de los tres ejes.

En la Figura VI se muestran las inversiones generadas por el software RES3DINV. Estos datos son los que se utilizaron en *Voxler* para el modelado tridimensional presentado en la Figura 21.

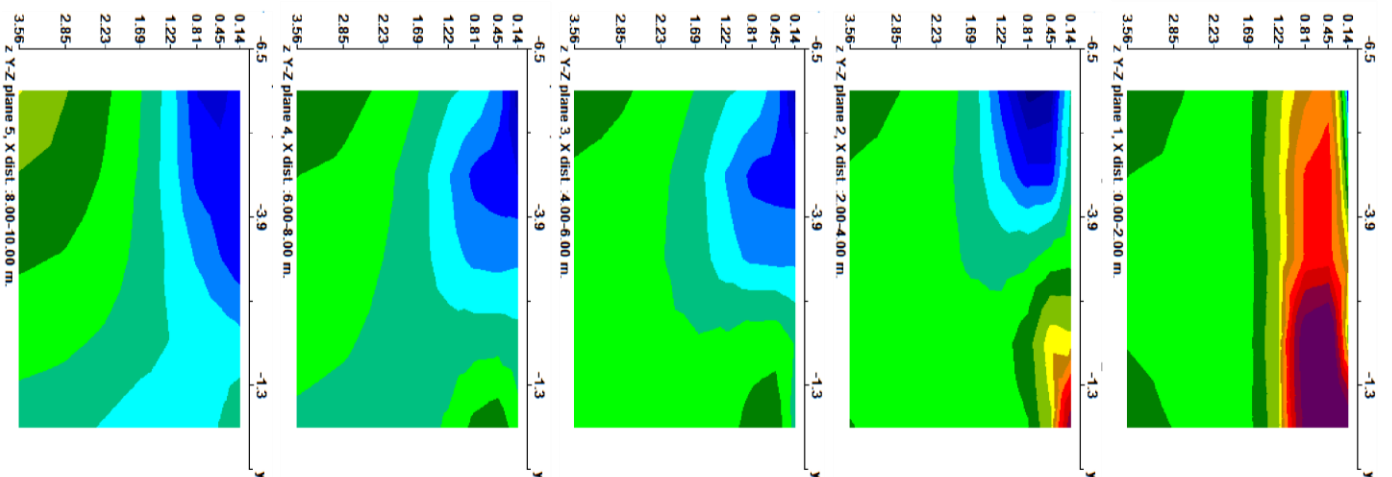


**Figura V.** Grilla de 10x6 utilizado para generar el modelo del Arreglo 3D. Los círculos rojos y azules sobre las líneas son los conectores de los cables de corriente conectados a electrodos. Aquellos que se encuentran sueltos, corresponden a conectores libres (1,20; 1,21; 2,21; 3,21; 4,21).

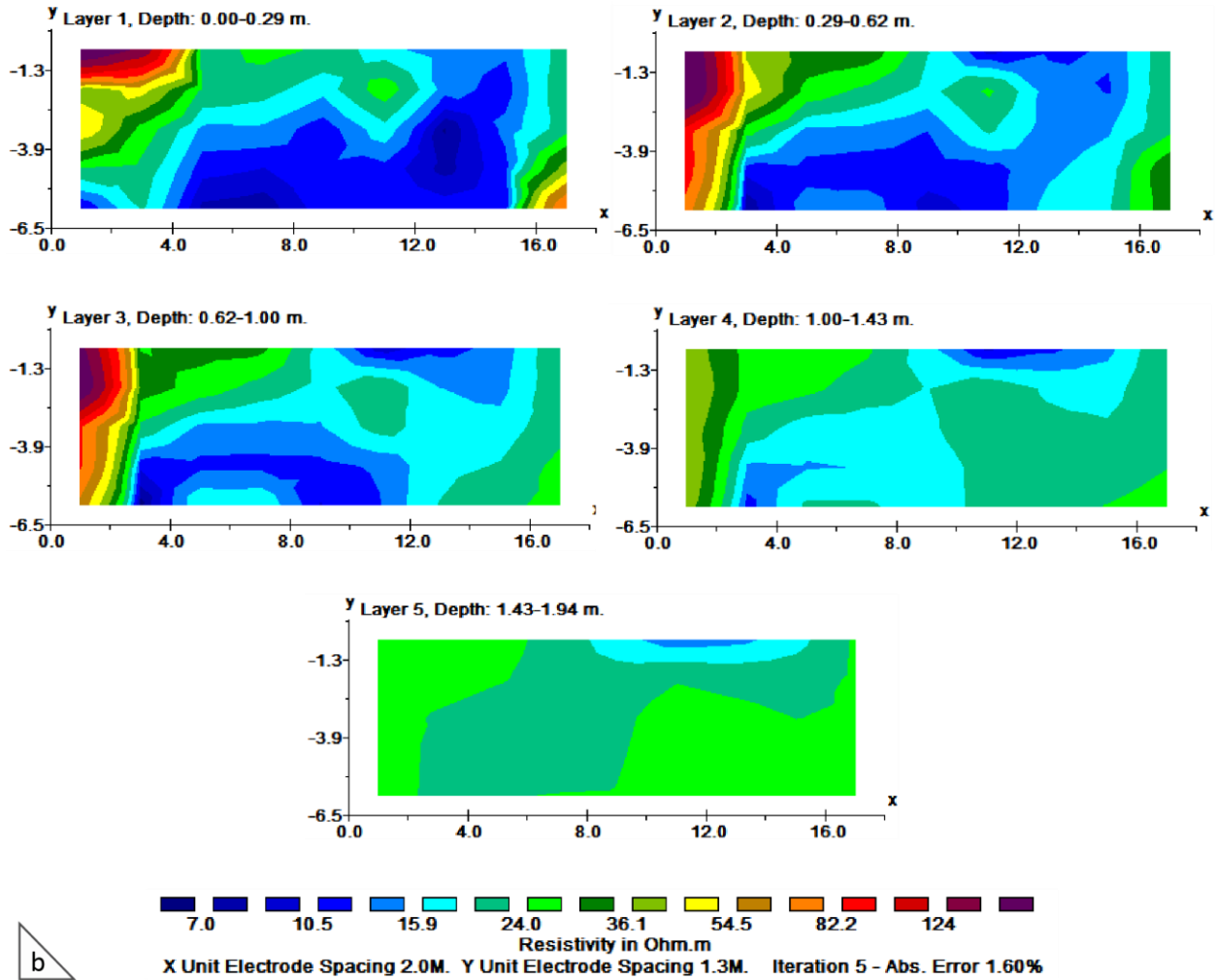
Secciones en el plano vertical X-Z - Arreglo 3D



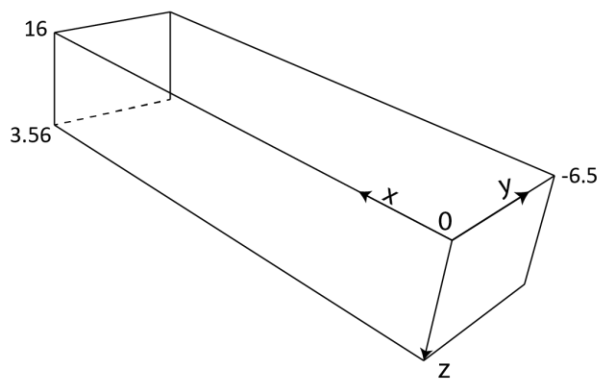
Secciones en el plano vertical Y-Z - Arreglo 3D



Secciones en plano horizontal Y-X - Arreglo 3D



b



c

Figura VI. a. Resultados de la inversión mediante RES3DINV de los planos horizontales del arreglo tridimensional. b. Resultados de la inversión de los planos verticales. c. Diagrama de ejes del prisma.

## ANEXO IV - Inclusión de datos topográficos a partir de archivos DEM utilizando Qgis.

La información de altitud en un DEM tipo *raster*, se encuentra incorporada en cada pixel que compone el DEM. Es decir, la altitud es constante dentro de cada pixel. Si el equipo investigador cuenta con un *drone* capaz de generar este tipo de información con suficiente resolución, puede ser un método a considerar.

Requisitos:

- 1- Contar con Qgis instalado en la computadora.
- 2- Complementos *QChainage* y *Point SamplingTool* instalados.
- 3- Tener archivo DEM de suficiente resolución georreferenciado.

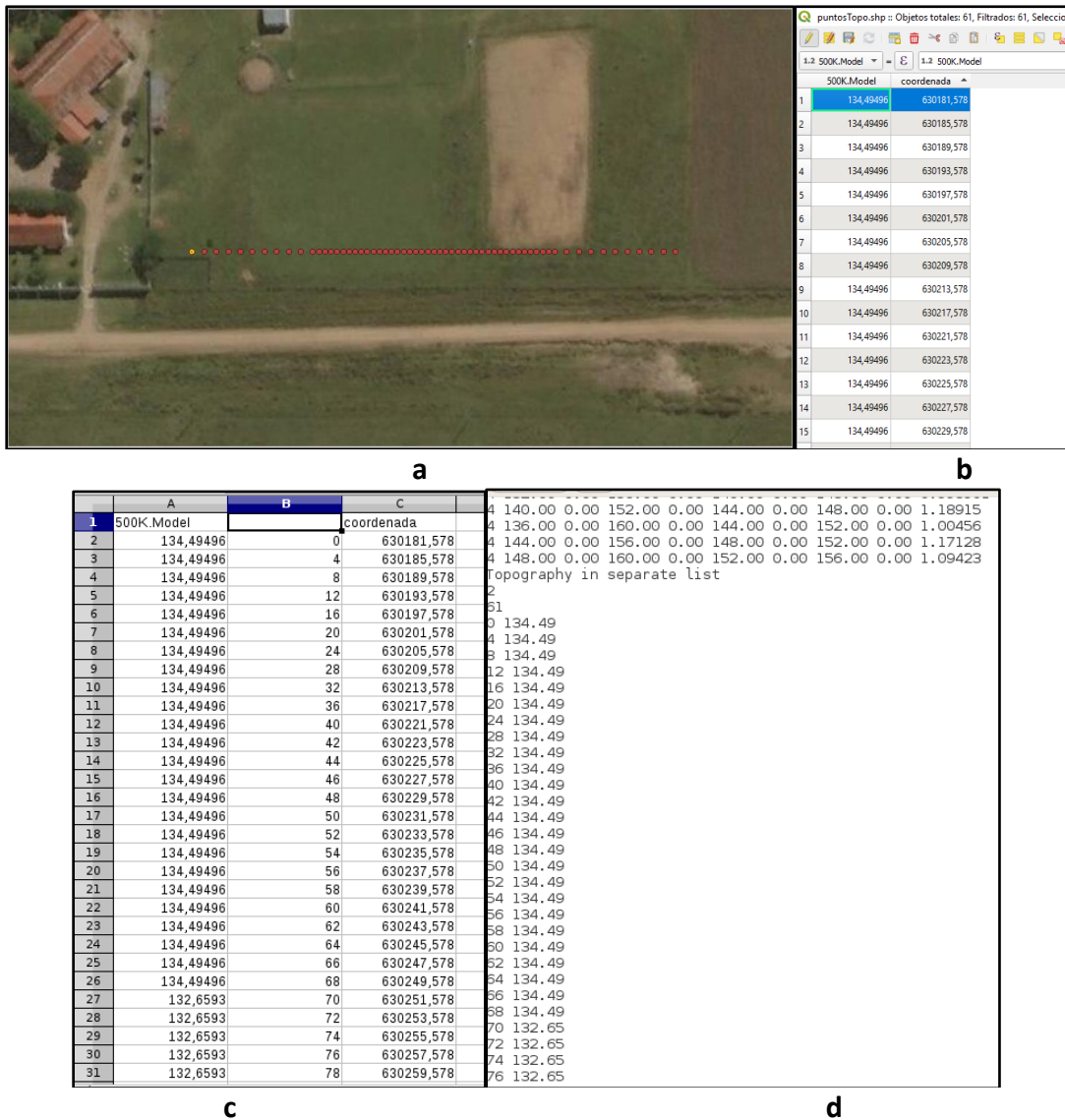
Lo primero que es necesario hacer es ubicar geográficamente los electrodos de la línea topográfica. Para esto es necesario tener la ubicación de al menos dos puntos (preferentemente el primer y último electrodo). Una vez que se georeferencian esos puntos, se utiliza el complemento *QChainage* para generar la necesaria cantidad de puntos equiespaciados entre ambos electrodos. Cada uno de los puntos intermedios entonces correspondería con cada uno del resto de los electrodos.

Posteriormente a cargar el DEM en el Qgis, utilizando el complemento *Point SamplingTool* se asigna a cada uno de los puntos (electrodos) los valores de elevación que se extraen del archivo DEM.

Para ingresar los datos de altitud al programa RES2DINV, es necesario asignarle a cada punto su localización horizontal dentro del tendido eléctrico en metros (Figura VII):

- a. Generar campo en la tabla de atributos con las coordenadas en x o y. Para esto, abrir la calculadora de campos, crear campo "decimal" y escribir \$x o \$y en el cuadrante de la descripción del campo a crear. Ordenar la tabla de atributos según las coordenadas (en orden creciente o decreciente según convenga).
- b. Exportar la tabla de atributos en formato Excel.
- c. Abrir el archivo Excel descargado y en la columna siguiente asignarle a cada elemento su ubicación en metros en el tendido eléctrico. Al haber establecido el orden de los electrodos en orden creciente o decreciente, este paso se realiza rápidamente.

Detección de estructuras subterráneas en el cuartel "Paso del Rey", Sarandí del Yí (Departamento de Durazno)



**Figura VII.** Pasos para la adquisición de datos topográficos a raíz de un archivo DEM. **a.** Obtención de puntos equidistantes con el complemento "QChainage". **b.** Imagen de tabla de atributos con los valores de altitud extraídos del DEM usando "Point SamplingTool" y valores de las coordenadas en x. Se encuentran ordenados de tal forma que el punto amarillo en (a) sea el primero en la lista. **c.** Imagen de tabla de atributos en formato excel donde se le agregó la ubicación de los puntos en metros teniendo como 0 m el punto amarillo (inicio del tendido eléctrico). **d.** Imagen del final del archivo .dat con los pares de datos (ubicación del punto topográfico, valor de altitud).

Estos pares de datos hay que agregarlos al final del archivo .dat generado por el tomógrafo (archivo con los valores de resistividad aparente) si se trabaja con el software RES2DINV. Para agregarlos al archivo .dat entonces, se lo abre con un editor de texto y se "pegan" los datos desde Excel siguiendo las indicaciones de Geotomo (2010) como se muestra en la Figura VIId. Lo único que resta hacer es realizar la inversión con el programa RES2DINV y en la visualización de los resultados, indicar que se considerará la topografía en el modelo final (Loke 1999; 2003; Geotomo 2010).