



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**APLICACIÓN DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA (ERT2D), POLARIZACIÓN INDUCIDA (IP2D) Y
MUESTREOS GEOQUÍMICOS PARA LA DETECCIÓN DE FILTRACIONES EN LAGUNAS DE
EFLUENTES DE ESTABLECIMIENTOS LECHEROS**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

AGUSTÍN MENTA ROMANO

TUTOR

DR. ANDRÉS TEJERO ANDRADE

FACULTAD DE INGENIERÍA

MONTEVIDEO, URUGUAY, DICIEMBRE DE 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”.

Agustín Menta

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Agustín Menta', written in a cursive style.

NOMBRE Y FIRMA

Agradecimientos

A CONACyT por brindarme la posibilidad de realizar la maestría en México a través de becas y a UNAM por ser la casa de estudios para el desarrollo de este posgrado. A todos los profesores y compañeros de posgrado por haberme hecho sentir como en mi casa en mi estancia en México.

Al Dr. Andrés Tejero Andrade por su aporte en este trabajo y las incontables horas de intercambio a pesar del desafío que planteó el avance del trabajo en modalidad virtual producto de la situación de pandemia a nivel mundial.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación ANII por financiar el proyecto de investigación en el que se desarrolló mi trabajo de tesis.

A la Facultad de Ingeniería y en particular al Grupo de Hidrología Subterránea del IMFIA por ser mi casa de estudios y trabajo. A Jorge de los Santos por haberme permitido desarrollarme en esta área y a Jimena Alonso por siempre estar disponible para apoyarme y discutir resultados. A la Universidad tecnológica (UTEC) por haberme permitido ausentarme durante mi estancia en México.

Al Departamento del Agua del CENUR, UdelaR por aportar recursos muy valiosos para el desarrollo de mi tesis y especialmente a Julián Ramos por siempre estar en todo momento y liderar el proyecto en el que se enmarca este trabajo.

Al equipo de trabajo que formó parte del proyecto por todas las horas de campo compartidas, sin ellos no hubiera sido posible este trabajo. Particularmente a Alfonso, Manuel, Juan Pablo, Santiago y Gonzalo por su ayuda y aportes en todo momento.

A Manuel, amigo de todas las horas, por brindarme su apoyo en momentos difíciles al encontrarnos lejos de la familia y por haber compartido el desafío de realizar el posgrado en UNAM.

A los establecimientos lecheros que permitieron el desarrollo de las tareas de campo en sus instalaciones y siempre ayudar en lo que fuese necesario.

A Cooperativa Nacional de Productores de leche (Conaprole) y Obras Sanitarias del Estado (OSE), por aportar información muy valiosa para el desarrollo de este trabajo.

Por último y no menos importante, a mi familia que siempre me han apoyado en todo momento y han sido mi sostén. A Georgina que siempre me apoyó, ayudó y acompañó en este camino.

Resumen

En Uruguay muchas de las lagunas de almacenamiento de efluentes de establecimientos lecheros no presentan una impermeabilización adecuada; esto presupone la posibilidad de que se produzcan infiltraciones de relevancia hacia el medio subterráneo. En el país actualmente no hay estudios que permitan verificar si las lagunas efectivamente infiltran o no líquido contaminado hacia el medio subterráneo.

Para investigar la posible contaminación del medio subterráneo se propone utilizar técnicas geofísicas no invasivas, aún no aplicadas para este problema en Uruguay, como es la aplicación de la tomografía de resistividad eléctrica (ERT2D) y polarización inducida (IP2D) en dos dimensiones.

Para lograr esto, se planteó la utilización en conjunto de la técnica de ERT2D e IP2D en dos sitios de estudio en zonas aledañas de las lagunas de almacenamiento de efluentes para evaluar de manera indirecta si existe infiltración desde las lagunas hacia el medio subterráneo.

Con el objetivo de establecer, en el caso de que exista, una correlación entre los parámetros fisicoquímicos que indiquen contaminación y los parámetros de resistividad y cargabilidad obtenidos en el levantamiento, se realizaron muestreos de suelos, del efluente de las lagunas de almacenamiento y del agua del medio subterráneo. Esta metodología se replicó en un sitio alejado de las lagunas de efluentes considerado como Sitio Blanco.

Se pudo observar respuesta geofísica en los sitios contaminados mediante las técnicas aplicadas. El trabajo de tesis permitió delinear y marcar las zonas contaminadas en las zonas aledañas a las lagunas, así como obtener los primeros valores geofísicos de resistividad y cargabilidad por contaminación de efluentes en zonas de lagunas. En términos generales la respuesta geofísica en las zonas contaminadas en estos dos sitios, fue la disminución de resistividad y aumento de cargabilidad respecto al medio. Los parámetros fisicoquímicos que mayor correlación obtuvieron con los parámetros geofísicos fueron el Calcio, Magnesio, Potasio y Cloruros.

Aún no es posible definir valores absolutos de resistividad y cargabilidad para contaminación por efluentes lecheros independientemente de la zona de estudio.

Abstract

In Uruguay, many of the effluent lagoons in dairy farms do not have an adequate waterproofing. This presupposes the possibility of relevant infiltrations into the underground. In the country there are not studies to verify whether or not the lagoons infiltrates contaminated liquid into the underground.

To investigate the possible contamination of the underground, it is proposed to use non-invasive geophysical techniques, not applied to this problem in Uruguay yet, such as the application of electrical resistivity tomography (ERT2D) and induced polarization (IP2D) in two dimensions.

To achieve this, the complementary use of the ERT2D and IP2D technique was proposed in two study sites in surrounding areas of the effluent storage lagoons to evaluate indirectly whether there is infiltration from the lagoons into the underground.

In order to establish, if it exists, a correlation between the physicochemical parameters that indicate contamination and the resistivity and chargeability parameters obtained in the survey, soil samples, effluent from the lagoons and groundwater samples were taken. This methodology was replicated in a site far from the effluent lagoons considered as a background site.

Geophysical response could be observed in the contaminated sites by the applied techniques. The thesis work allowed delineating and marking the contaminated areas in the areas surrounding of the lagoons, as well as obtaining the first geophysical values of resistivity and chargeability due to contamination of effluents in lagoon areas. In general terms, the geophysical response in the contaminated areas in these two sites was the decrease in resistivity and increase in chargeability respect to the medium. The physicochemical parameters that obtained the highest correlation with the geophysical parameters were Calcium, Magnesium, Potassium and Chlorides.

It is not yet possible to define absolute values of resistivity and chargeability for contamination by dairy effluents regardless of the study area.

Índice

Resumen.....	4
Abstract	4
Índice de Figuras	8
Índice de Tablas.....	11
1 Introducción	12
1.1 Generalidades	12
1.2 Objetivo General	15
1.2.1 Objetivos Específicos.....	15
1.3 Hipótesis.....	15
2 Fundamento Teórico	16
2.1 Ecuaciones Fundamentales.....	16
2.2 Resistividad aparente	18
2.3 Arreglos electródicos.....	18
2.4 Profundidad de Investigación.....	19
2.4.1 Tomografía Eléctrica.....	23
2.5 Teoría de la Inversión	24
2.6 Polarización Inducida	25
2.6.1 Tipos de Polarización.....	26
2.6.2 Teoría electromagnética de la Polarización Inducida	28
2.6.3 Mecanismos de medición de IP. Dominio de Tiempo y Frecuencia.....	31
2.6.4 Cargabilidad Aparente.....	32
2.6.5 Disposición de electrodos	34
2.6.6 Proceso de inversión	34
2.7 Método de ajuste por Mínimos Cuadrados	34
2.7.1 Datos Anómalos	37
2.7.2 Evaluación del modelo obtenido.....	37
3 Metodología	39
3.1 Selección Sitios de Estudio	39
3.2 Prospección geofísica	39
3.2.1 Sitio 1.....	40
3.2.2 Sitio 2.....	42
3.2.3 Procesamiento e Inversión del levantamiento de datos.....	43
3.3 Muestreo de parámetros físicoquímicos de suelo agua y efluente.....	44
3.3.1 Recolección, conservación y transporte de muestras.....	44
3.3.2 Análisis de laboratorios y técnicas analíticas	45

3.3.3	Calidad de los análisis.....	46
3.3.4	Sitio 1.....	46
3.3.5	Sitio 2.....	47
3.4	Correlación de datos geofísicos y muestreo	48
4	Resultados	50
4.1	Descripción de los sitios de estudio	50
4.1.1	Sitio 1-INIA La Estanzuela	50
4.1.2	Sitio 2.....	55
4.2	Prospección Geofísica	59
4.2.1	Sitio 1.....	59
4.2.2	Sitio 2.....	70
4.3	Parámetros Físicoquímicos	76
4.3.1	Sitio 1.....	76
4.3.2	Sitio 2.....	87
4.4	Correlación Geofísica-Parámetros físicoquímicos.....	95
4.5	Discusión de resultados Sitio 1.....	106
4.6	Discusión de resultados Sitio 2.....	108
4.7	Comparación resultados sitios estudiados.....	109
5	Conclusiones y Recomendaciones	112
5.1	Conclusiones.....	112
5.2	Recomendaciones	114
6	Bibliografía	115
7	Anexo.....	121

Índice de Figuras

Figura 1: Establecimientos lecheros en Uruguay. Coordenadas en UTM 21S (m).....	14
Figura 2: Establecimientos lecheros en cuenca Santa Lucía y acuífero Raigón. Coordenadas en UTM 21S (m).....	15
Figura 3: Densidad de corriente y superficies equipotenciales en un semiespacio homogéneo alrededor de un electrodo puntual de corriente. Fuente Loke (2004).	17
Figura 4: Arreglo tetraelectródico de dos electrodos de inyección de corriente (C1 y C2) y dos electrodos de medición de potencial (P1 y P2). Extraído de Loke (2004).....	17
Figura 5: Arreglo tetraelectródico para medición eléctrica. Fuente: Extraído de Reynolds (1997).	18
Figura 6: Función de sensibilidad 1-D para el arreglo Polo-polo. Fuente Loke (2004)	20
Figura 7: Esquema de medición de ERT2D en campo. Extraído de Griffiths and Barker (1993). 23	
Figura 8: Efecto de sobrevoltaje debido a polarización inducida. Fuente Reynolds (1977)	26
Figura 9: Polarización electrónica o de grano. (a) flujo electrónico sin restricción en un conducto. (b) polarización de un grano conductivo electrónicamente, bloqueando un canal. Fuente Reynolds, 1997).....	27
Figura 10: Polarización de membrana. (a) Contracción de conducto. (b) polarización entorno a arcillas y filamentos fibrosos. Fuente Reynols, (1997).....	27
Figura 11: Medición en el dominio del tiempo. Fuente Gazoty et al., (2012)	30
Figura 12: (a) Sección de una roca mineralizada que presenta conductos bloqueados y no bloqueados. (b) Circuito equivalente para la roca mineralizada. (c) Respuesta en el dominio de frecuencia típica para el circuito equivalente (d) Respuesta en el dominio de tiempo correspondiente a la frecuencia en (c). Fuente Pelton (1978).	31
Figura 13: Ajuste por mínimos cuadrados empleando un ajuste con $w=1$ y w calculados mediante estadística. Fuente Wolberg (2006).	36
Figura 14: Electrodos no polarizables para IP (izq.), electrodo con solución de sulfato de cobre (der.).....	40
Figura 15: Transectos de ERT2D e IP2D en LA. Coordenadas en UTM 21S (m).	40
Figura 16: Electrodos de ERT2D e IP2D en LA. Coordenadas en UTM 21S (m).....	41
Figura 17: Transectos de ERT2D e IP2D en LG. Coordenadas en UTM 21S (m).	41
Figura 18: Electrodos de ERT2D e IP2D en LG. Coordenadas en UTM 21S (m).....	41
Figura 19: Transecto y Electrodos de ERT2D e IP2D en Sitio Blanco en INIA La Estanzuela. Coordenadas en UTM 21S (m).	42
Figura 20: Transectos de ERT2D e IP2D en lagunas en Sitio 2. Coordenadas en UTM 21S (m)..	42
Figura 21: Electrodos de ERT2D e IP2D en lagunas en Sitio 2. Coordenadas en UTM 21S (m). .	43
Figura 22: Transecto y Electrodos de ERT2D e IP2D en Sitio Blanco en Sitio 2. Coordenadas en UTM 21S (m).....	43
Figura 23: Perforadora <i>Big Beaver</i> -torre con comando hidráulico	45
Figura 24: Sitios de muestreo en Sitio 1. Coordenadas en UTM 21S (m).	47
Figura 25: Sitios de muestreo en Sitio 2. Coordenadas en UTM 21S (m).	48
Figura 26: Establecimientos lecheros seleccionados para realizar los estudios. Coordenadas en UTM 21S (m).....	50
Figura 27: Lagunas de almacenamiento de efluente y Sitio Blanco en INIA La Estanzuela. Coordenadas en UTM 21S (m).	51
Figura 28: Carta de Suelos Sitio 1. Escala: 1:200.000 (Fuente MGAP). Coordenadas en UTM 21S (m).	51
Figura 29: Geología de superficie Sitio 1. Escala 1:100000 (Fuente DINAMIGE. Dirección Nacional de Minería y Geología). Coordenadas en UTM 21S (m).....	52
Figura 30: LG en INIA.....	53
Figura 31: LA en INIA.	53

Figura 32: Perforación de abastecimiento de INIA y sitios de levantamiento geofísico. Coordenadas en UTM 21S (m).	54
Figura 33: Puntos importantes relevados en LG.	54
Figura 34: Puntos importantes relevados en LA	55
Figura 35: Lagunas de almacenamiento de efluente y Sitio Blanco en Sitio 2. Coordenadas en UTM 21S (m).....	56
Figura 36: Carta de Suelos Sitio 2. Escala: 1:40.000 (Fuente MGAP). Coordenadas en UTM 21S (m).	56
Figura 37: Geología de superficie Sitio 2. Escala 1:500000 (Fuente DINAMIGE). Coordenadas en UTM 21S (m).....	57
Figura 38: Laguna impermeabilizada con membrana geotextil Sitio 2.	58
Figura 39: Perforaciones existentes en el establecimiento. Coordenadas en UTM 21S (m).	59
Figura 40: Perfiles de ERT2D en 3D obtenidos con disposición electródica Schlumberger sobre imagen satelital en LA.	60
Figura 41: Perfiles de IP2D en 3D obtenidos sobre imagen satelital en LA.	60
Figura 42: Perfiles de ERT2D en 3D obtenidos con disposición electródica Schlumberger sobre imagen satelital en LG.	61
Figura 43: Perfiles de IP2D en 3D obtenidos sobre imagen satelital en LG.	61
Figura 44: Perfil de ERT2D obtenido con disposición electródica Wenner Alpha sobre imagen satelital en Sitio Blanco.	62
Figura 45: Perfil de IP2D obtenido sobre imagen satelital en Sitio Blanco.	62
Figura 46: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 4 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger. Punteado rojo indica anomalía geofísica.	64
Figura 47: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 6 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger. Punteado rojo indica anomalía geofísica.	64
Figura 48: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 6 de LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger. Punteado rojo indica anomalía geofísica.	65
Figura 49: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 4 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.....	67
Figura 50: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 6 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.....	68
Figura 51: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP Sitio Blanco, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.	69
Figura 52: Perfiles de ERT2D en 3D obtenidos sobre imagen satelital en zona de laguna.	70
Figura 53: Perfiles de IP2D en 3D obtenidos sobre imagen satelital en zona de lagunas	70
Figura 54: Perfil de ERT2D obtenido con disposición electródica Schlumberger sobre imagen satelital en Sitio Blanco.	71
Figura 55: Perfiles de IP2D obtenidos sobre imagen satelital en Sitio Blanco.....	71
Figura 56: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Schlumberger. Punteado rojo indica anomalía geofísica.	73
Figura 57: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 1 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo. Punteado rojo indica anomalía geofísica.....	75
Figura 58: Perfil de ERT Schlumberger con perforación realizada en LA-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada	76
Figura 59: Perfiles de IP y ERT Dipolo Dipolo con perforación realizada en LA-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada	77
Figura 60: Perfil de ERT Schlumberger con perforación realizada en LG-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada	78
Figura 61: Perfiles de IP y ERT Dipolo Dipolo con perforación realizada en LG-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada	79
Figura 62: Perfil de ERT Schlumberger con perforación realizada en Sitio Blanco-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada	80

Figura 63: Perfiles de IP y ERT Dipolo Dipolo con perforación realizada en Sitio Blanco-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada	81
Figura 64: Parámetros químicos para los puntos de muestreo a diferente profundidad-Sitio 1. (a) Calcio (meq Ca/100g), (b) Magnesio (meq Ca/100g), (c) Sodio intercambiable (meq Na/100g), (d) Cloruro (ppm), (e) Potasio intercambiable (mg K/100g), (f) Carbono Orgánico (%), (g) Nitratos (mg N-NO ₃), (h) Fosfatos (ppm PO ₄).....	83
Figura 65: Parámetros físicos para los puntos de muestreo a diferente profundidad-Sitio 1. (a) pH del agua, (b) Humedad (%), (c) Conductividad (μS/cm).	83
Figura 66: Diagrama Stabler Sitio 1	85
Figura 67: Diagrama de Piper Agua de abastecimiento INIA La Estanzuela.	85
Figura 68: Diagrama de Schoeller Agua de abastecimiento INIA La Estanzuela.	86
Figura 69: Perfil de ERT Schlumberger con perforación realizada en zona de Lagunas-Sitio 2. Línea gris representa la perforación realizada	87
Figura 70: Perfiles de IP y ERT Dipolo Dipolo con perforación realizada zona de Lagunas-Sitio 2. Línea gris representa la perforación realizada	88
Figura 71: Perfil de ERT Schlumberger con perforación realizada en zona de Sitio Blanco-Sitio 2. Línea gris representa la perforación realizada.....	89
Figura 72: Perfiles de IP y ERT Dipolo Dipolo con perforación realizada zona de Sitio Blanco-Sitio 2. Línea gris representa la perforación realizada	90
Figura 73: Parámetros químicos para los puntos de muestreo a diferente profundidad-Sitio 2. (a) Calcio (meq Ca/100g), (b) Magnesio (meq Ca/100g), (c) Sodio intercambiable (meq Na/100g), (d) Cloruro (ppm), (e) Potasio intercambiable (mg K/100g), (f) Carbono Orgánico (%), (g) Nitratos (mg N-NO ₃), (h) Fosfatos (ppm PO ₄).....	92
Figura 74: Parámetros físicos para los puntos de muestreo a diferente profundidad-Sitio 2. (a) pH del agua, (b) Humedad (%), (c) Conductividad (μS/cm).	92
Figura 75: : Diagrama Stabler perforaciones Sitio 1 y Sitio 2	94
Figura 76: Diagrama de Piper agua de perforaciones Sitio 2.	94
Figura 77: Diagrama de Schoeller Agua de perforaciones Sitio 2.	95
Figura 78: Concentración ión Cloruro, Sulfato y Nitratos para las perforaciones del Sitio 2 y Sitio cercano.....	95
Figura 79: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad mediante arreglo Schlumberger. OLS (azul), WLS (rojo).....	97
Figura 80: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y cargabilidad. Ajuste lineal ordinario (azul), Ajuste por pesos (rojo).....	98
Figura 81: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad mediante arreglo Schlumberger. OLS (azul), WLS (rojo).....	102
Figura 82: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y cargabilidad. Ajuste lineal ordinario (azul), Ajuste por pesos (rojo).....	103
Figura 83: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 3 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.....	108
Figura 84: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 3 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo. Línea punteada de rojo indica anomalía geofísica de interés.....	108

Índice de Tablas

Tabla 1: Esquemas y constantes geométricas de diferentes arreglos electródicos. (Modificado de Loke, 2004).....	19
Tabla 2: Profundidad media de investigación (Ze) en función de la separación entre electrodos (a) y el largo de la medición (L). También se incluye el factor geométrico K según el arreglo y el factor inverso geométrico. Extraído de Loke (2004).....	21
Tabla 3: Parámetros físico químicos realizados en agua, suelo y efluente en cada sitio.....	45
Tabla 4: Sitio de muestreo relativo a levantamiento geofísico	47
Tabla 5: Sitio de muestreo relativo a levantamiento geofísico.....	48
Tabla 6: Características perforación abastecimiento INIA	53
Tabla 7: Características puntos importantes relevados en LG y LA	55
Tabla 8: Características perforaciones existentes en el establecimiento.	58
Tabla 9: Parámetros fisicoquímicos efluente LA y con LG. Sitio 1	83
Tabla 10: Parámetros Fisicoquímicos de agua subterránea perforación INIA.....	84
Tabla 11: Parámetros fisicoquímicos efluente Laguna. Sitio 2	93
Tabla 12: Parámetros Fisicoquímicos de agua subterránea perforaciones Sitio 2.	93
Tabla 13: Correlación Humedad y parámetros Geofísicos.....	99
Tabla 14: Correlación pH y parámetros Geofísicos	99
Tabla 15: Correlación Conductividad y parámetros Geofísicos	99
Tabla 16: Correlación Cloruros y parámetros Geofísicos	99
Tabla 17: Correlación Nitratos y parámetros Geofísicos	99
Tabla 18: Correlación Fosfatos y parámetros Geofísicos	100
Tabla 19: Correlación Calcio y parámetros Geofísicos	100
Tabla 20: Correlación Magnesio y parámetros Geofísicos.....	100
Tabla 21: Correlación Potasio y parámetros Geofísicos.....	100
Tabla 22: Correlación Humedad y parámetros Geofísicos.....	104
Tabla 23: Correlación pH y parámetros Geofísicos	104
Tabla 24: Correlación Conductividad y parámetros Geofísicos	104
Tabla 25: Correlación Cloruros y parámetros Geofísicos	104
Tabla 26: Correlación Nitratos y parámetros Geofísicos	104
Tabla 27: Correlación Fosfatos y parámetros Geofísicos	105
Tabla 28: Correlación Calcio y parámetros Geofísicos	105
Tabla 29: Correlación Magnesio y parámetros Geofísicos.....	105
Tabla 30: Correlación Potasio y parámetros Geofísicos.....	105
Tabla 31: Coeficientes de correlación de Pearson (r^2) entre parámetros fisicoquímicos de suelo y parámetros geofísicos en ambos sitios	111

1 Introducción

1.1 Generalidades

En Uruguay existen 3718 establecimientos lecheros (DIEA, 2018) y 4500 lagunas de efluentes de establecimientos lecheros INALE (2014) (Figura 1). La mayor concentración de establecimientos lecheros se localizan, en parte, en los departamentos de Florida y San José. Esta zona coincide geográficamente con cuencas superficiales como la cuenca del río Santa Lucía y la cuenca hidrogeológica del Sistema Acuífero Raigón (Figura 2).

El ente regulador medioambiental del país, Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA), exige para la correcta gestión de los efluentes en establecimientos lechero, la utilización de lagunas de almacenamiento o tratamiento biológico. El sistema tradicional constructivo de las lagunas es de impermeabilización con arcilla compactada. Actualmente en Uruguay, muchas de las lagunas de efluentes de establecimientos lechero están siendo impermeabilizadas con membrana geotextil y han generado un cambio importante en los sistemas constructivos de los sistemas de lagunas en establecimientos lecheros.

La normativa vigente dispone que las lagunas deben minimizar la infiltración de líquidos residuales al subsuelo, exigiendo valores de permeabilidad inferiores a 10^{-7} cm/s. Las deficiencias constructivas de muchas de estas obras contribuyen a que se produzcan infiltraciones de relevancia hacia el medio subterráneo, generando la contaminación del subsuelo y del agua subterránea. Actualmente la única alternativa posible para la evaluación de la permeabilidad de las lagunas requiere de realizar el vaciado de la laguna y realizar ensayos geotécnicos en taludes y fondo de las mismas, situación que es poco práctica para los establecimientos que tienen sus lagunas en funcionamiento. Esto se debe a que el vaciado y oreado de las lagunas requiere de varios días de ejecución y se deben direccionar los efluentes hacia otro punto generando posibles problemas de contaminación.

La medición de resistividad eléctrica del terreno ha sido utilizada por muchas décadas en investigaciones hidrogeológicas, mineras y geotécnicas. Sin embargo, Loke (2004), plantea que últimamente esta técnica está siendo utilizada para monitoreo en investigaciones ambientales. Depountis et al. (2005), Massuel et al. (2006), Brunet et al. (2010) y Clement et al. (2010) concuerdan que el método de ERT se está convirtiendo en una herramienta muy útil para estudiar infiltración en diferentes medios porosos. Degueurce et al. (2016) realizaron estudios en Francia sobre la propagación del lixiviado en una planta de digestión anaeróbica de residuos sólidos agrícolas (biodigestor) mediante el uso de ERT. En este estudio se encontró que el método de la ERT, a través de la resistividad eléctrica del suelo, parece ser el más adecuado para estudiar la propagación del lixiviado de efluentes agrícolas en el tiempo. También concluyen que el método de la ERT fue capaz de identificar infiltraciones. A nivel regional, se han realizado investigaciones empleando la técnica geoeléctrica para detectar y diagnosticar la contaminación en suelo y agua subterránea producto de la actividad ganadera. En Argentina, Sainato et al. (2006) emplearon Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) en un establecimiento lechero y en un criadero de porcinos con el fin de detectar anomalías de resistividad en la zona no saturada y en el agua subterránea. Mediante esta técnica pudieron detectar anomalías en sitios cercanos a los corrales. Posteriormente, Losinno et al. (2008) y Sainato et al. (2010) aplicaron la técnica de ERT2D en sitios potencialmente contaminados en establecimientos lecheros en la Provincia de Buenos Aires y lograron detectar anomalías de resistividad asociada a la contaminación en zonas de alimentación de ganado y cercano a una laguna de efluente. En el caso de Losinno et al. (2008) emplearon arreglos electródicos Wenner y Dipolo Dipolo. Las zonas de contaminación definidas a partir del porcentaje de variación de resistividad respecto al sitio blanco (sitio que se encuentra aguas arriba del foco de contaminación y sin la afectación de contaminantes similares) y los análisis de suelos hasta 1 metro de profundidad y del agua subterránea, indicaron que los valores de resistividad que indican contaminación fue menor a 9 ohm.m y variación del 60%

respecto al sitio testigo, para un sitio con un suelo franco limoso. Para un suelo franco arenoso, la resistividad de los sitios contaminados fue menor a 10 ohm.m con una variación del 80% respecto al sitio testigo. Los parámetros fisicoquímicos que indicaron mayor contaminación en suelo fueron la conductividad eléctrica, nitratos y fósforo. Para el caso del agua subterránea, los parámetros fisicoquímicos que más diferencias presentaron respecto a los sitios testigos fueron los nitratos y cloruros. Sainato et al. (2011) y Molina et al. (2014) combinaron la técnica de ERT2D con muestreo de suelo convencional en sitios anómalos detectados por la técnica geoelectrica y establecieron que la resistividad puede ser considerada un indicador de variaciones del contenido de humedad, materia orgánica y concentración de nitratos en el subsuelo en feedlots. En el caso de Sainato et al. (2011) realizaron modelos 2D y 3D de conductividad eléctrica (inverso de la resistividad) del medio subterráneo mediante el arreglo electrodico Dipolo Dipolo. Encontraron que los sitios contaminados presentaron mayores valores de conductividad eléctrica respecto a los sitios blancos. En este estudio realizaron una correlación cruzada entre los parámetros fisicoquímicos del muestreo de suelo hasta los 80 cm de profundidad y la conductividad eléctrica media obtenida mediante la ERT2D. Para la conductividad eléctrica media, se consideraron seis celdas alrededor de la celda que coincide con el sitio de muestreo. En este caso, obtuvieron coeficientes de correlación mayor a 0.8 entre la conductividad eléctrica media y el fosforo, los nitratos y la conductividad eléctrica de la muestra de suelo y obtuvieron una baja correlación con el carbono total orgánico. Para las mayores concentraciones de estos parámetros fisicoquímicos, los valores de resistividad asociados son menores a 7 ohm.m para un suelo limo arcilloso. Respecto a la concentración de los iones en el agua subterránea y la conductividad eléctrica media, obtuvieron una correlación mayor a 0.91 para sulfatos, cloruros y potasio. Mientras que para nitratos, obtuvieron una correlación inferior.

El método de Polarización Inducida (IP) ha sido empleado para estudios de contaminación del medio subterráneo desde hace relativamente poco tiempo. En este sentido, Slater y Lesmes (2002) plantean que en parte se debe a un procedimiento más complejo de adquisición de la información y a que la interpretación fisicoquímica de los parámetros de IP aún no está del todo comprendida. Leroux (2007) empleó la resistividad y mediciones de IP en dominio del tiempo para una zona de restauración de un relleno sanitario. En este caso, la medición de IP se realizó con un período de medición de 4.4 s y se integró el potencial para 10 ventanas de mediciones. En este caso, los residuos consistían en una mezcla de materiales con alto contenido orgánico y bolsas plásticas pero con una alta heterogeneidad en su distribución espacial. Los valores de resistividad y cargabilidad mostraron que la cobertura del relleno presentó una relación de alta resistividad y baja cargabilidad y de manera inversa, en la zona del relleno. En la zona del relleno se obtuvieron valores de resistividad menores a 10 ohm.m y de cargabilidad por encima de 50 mV/V. En este estudio encontraron que las arcillas presentaban una baja cargabilidad. Leroux (2007) plantea la ventaja de aplicar de manera combinada dos técnicas geofísicas y el contraste de los parámetros obtenidos.

Gazoty et al. (2012) emplearon la IP2D junto con mediciones geoelectricas de resistividad y perfilaje de pozos mediante rayos gamma para la delimitación de un relleno sanitario y la definición de la geología del sitio. Obtuvieron una buena correlación entre los perfiles de IP2D, ERT2D y los datos obtenidos por las perforaciones. En este caso Gazoty et al. (2012) realizaron mediciones de IP2D con un tiempo total de 4s y 20 ventanas para cada medición. Obtuvieron valores de 80 mV/V para las arcillas de origen glaciar y de 10 a 30 mV/V para las arenas. En el caso de la zona del relleno sanitario, obtuvieron valores entre 350 y 400 mV/V. El contenido del relleno sanitario se caracteriza por presentar hidrocarburos, acero y compuestos inorgánicos. También les permitió discernir entre capas de arenas puras y arenas con alto contenido de arcilla debido al aumento en la cargabilidad.

Kemna et al. (2012), plantean la potencialidad del uso de IP2D para la caracterización del medio subterráneo y monitoreo ambiental. Concluyen que el método de IP2D ofrece potencial para

estructuras subsuperficiales así como caracterización de procesos. Las áreas de aplicación más prometedoras son la hidrogeofísica y biogeofísica donde la IP es una técnica no invasiva, que permite obtener información textural, hidráulica o biogeoquímica.

La aplicación de la técnica de IP en el estudio de contaminación por efluentes lecheros de establecimientos lechero no se ha encontrado en la revisión bibliográfica realizada.

Como se mencionó anteriormente, en el país no existe una técnica no invasiva y fácilmente replicable que permita determinar efectivamente si una laguna está infiltrando o no líquido contaminado hacia el medio subterráneo. Por este motivo, en este trabajo se planteó la utilización en conjunto de la técnica de ERT2D e IP2D en zonas aledañas de las lagunas de almacenamiento de efluente para evaluar de manera indirecta si existe infiltración desde las lagunas hacia el medio subterráneo. Con el objetivo de establecer, en el caso de que exista, una correlación entre los parámetros fisicoquímicos que indiquen contaminación y los parámetros geofísicos obtenidos en el levantamiento, se realizaron muestreos de suelos, del efluente de las lagunas de almacenamiento y del agua del medio subterráneo.

Los estudios que se desarrollan en este trabajo se centran en la zona de mayor concentración de establecimientos lecheros del país bajo diferentes escenarios edafo-geológicos y constructivos.

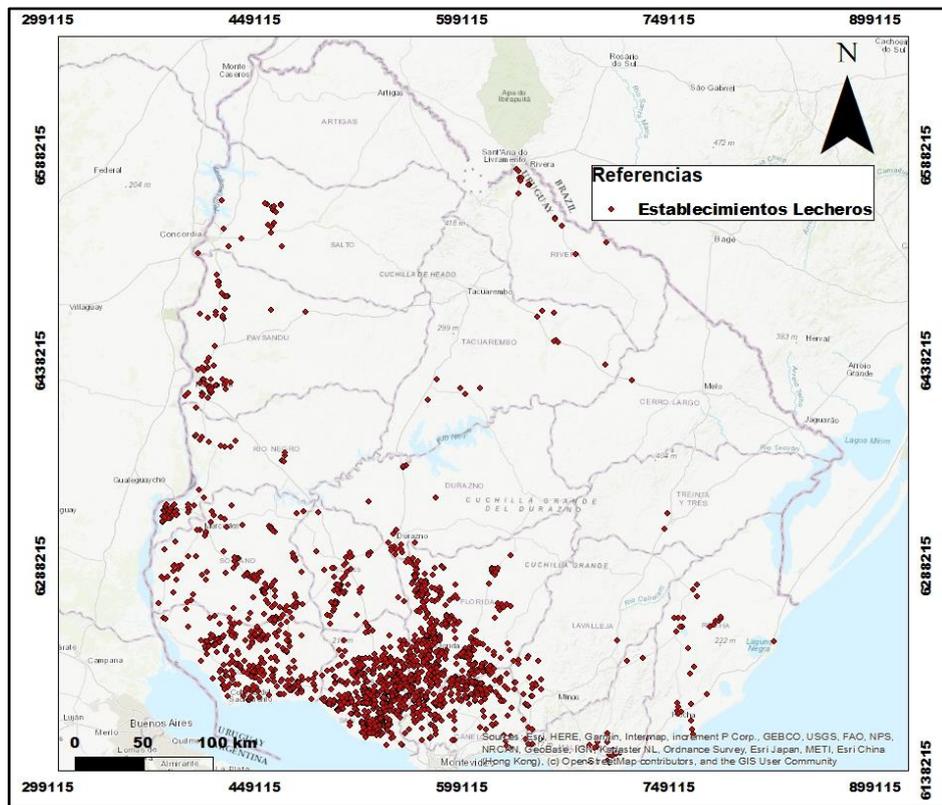


Figura 1: Establecimientos lecheros en Uruguay. Coordenadas en UTM 21S (m).

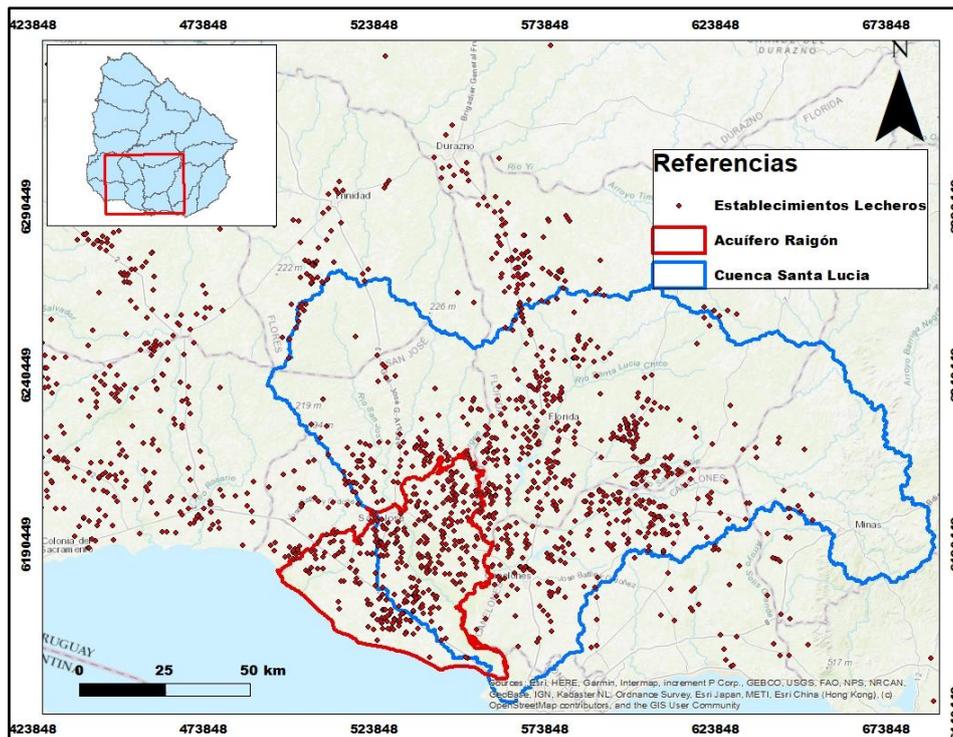


Figura 2: Establecimientos lecheros en cuenca Santa Lucía y acuífero Raigón. Coordenadas en UTM 21S (m).

1.2 Objetivo General

Evaluar la efectividad de la aplicación de ERT2D e IP2D que permita identificar y cuantificar de forma indirecta la existencia de infiltración de efluentes de establecimientos lecheros, desde las lagunas de almacenamiento hacia el medio subterráneo, ya sea en la zona no saturada o saturada y su correlación con los análisis geoquímicos de suelo, agua y efluente de las lagunas.

1.2.1 Objetivos Específicos

Definir posibles zonas de contaminación con los parámetros de resistividad y cargabilidad.

Correlacionar la resistividad y cargabilidad con los parámetros geoquímicos obtenidos en los muestreos de suelos realizados.

1.3 Hipótesis

Mediante la aplicación de tomografías de resistividad eléctrica (ERT2D) y de polarización inducida (IP2D), es posible detectar filtraciones en lagunas de tratamiento / almacenamiento de efluentes de establecimientos lechero.

2 Fundamento Teórico

En este capítulo se presentan los aspectos fundamentales de la teoría empleada en el trabajo realizado y la aplicación a diferentes casos de estudios de ERT2D e IP2D que sustentan la elección de estos métodos geofísicos para esta investigación.

Orellana (1972) define la prospección geofísica como la rama de la física aplicada que se ocupa del estudio de las estructuras ocultas del interior de la tierra y de la localización de cuerpos delimitados por el contraste de alguna de sus propiedades físicas con las del medio circundante, por medio de observaciones realizadas en la superficie de la tierra.

El propósito de realizar mediciones geoeléctricas es el de determinar, mediante levantamiento en superficie, la distribución de la resistividad en la subsuperficie. La resistividad puede relacionarse con varios parámetros geológicos como el contenido mineral y de fluidos, la porosidad y el grado de saturación del medio (Loke, 2004).

2.1 Ecuaciones Fundamentales

Orellana E. (1972) establece que las ecuaciones fundamentales que gobiernan el flujo de corriente en el suelo se pueden expresar como:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad 1$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad 2$$

Según Loke (2004) la ley de Ohm relaciona a ambos campos y gobierna el flujo de corriente en el suelo:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad 3$$

Donde σ es la conductividad del medio, \mathbf{J} es la densidad de corriente y \mathbf{E} es el campo eléctrico.

De acuerdo a la ecuación 1, el campo eléctrico se puede expresar en función del potencial como:

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad 4$$

De la ecuación 3 y 4 sustituyendo en 2 se obtiene:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad 5$$

Por lo tanto si consideramos un medio homogéneo e isótropo, de la expresión 5 se obtiene:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad 6$$

Si se considera una fuente puntual (Figura 3) y se considera un volumen infinitesimal alrededor de la fuente puntual de corriente I localizado en el punto (x_s, y_s, z_s) , la relación entre la densidad de corriente y la corriente está dada por Loke (2004):

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \left(\frac{I}{\Delta V}\right) \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad 7$$

Donde δ es la función delta de Dirac y ΔV la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

Combinando (6) y (7) se obtiene:

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = \left(\frac{I}{\Delta V}\right) \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad 8$$

La expresión 8 muestra la distribución del potencial en un medio heterogéneo y anisótropo, debido a una fuente puntual de corriente.

Si consideramos una fuente puntual (Figura 3) en un medio homogéneo e isótropo, el potencial que se deduce de la ecuación 7 se puede expresar como:

$$\varphi = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad 9$$

Donde ρ se denomina resistividad y es el inverso de la conductividad $\rho=1/\sigma$ y r es la distancia del punto considerado a la fuente.

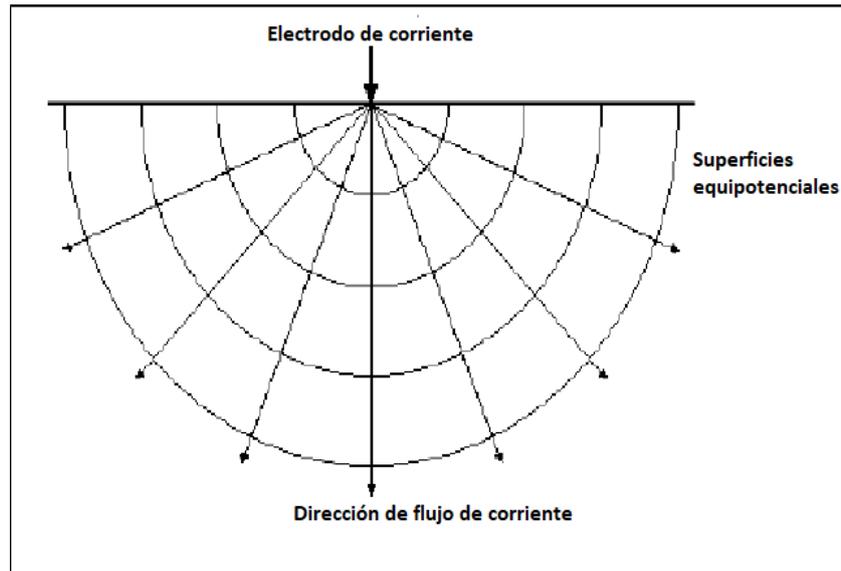


Figura 3: Densidad de corriente y superficies equipotenciales en un semiespacio homogéneo alrededor de un electrodo puntual de corriente. Fuente Loke (2004).

Si se consideran dos electrodos de inyección de corriente, como se realiza en la práctica, el valor del potencial en el medio es:

$$\varphi = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad 10$$

Donde r_1 y r_2 son las distancias del punto considerado a cada uno de los electrodos.

Por lo tanto la diferencia de potencial entre dos puntos queda:

$$\Delta\varphi = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{1p1}} - \frac{1}{r_{2p1}} - \frac{1}{r_{1p2}} + \frac{1}{r_{2p2}} \right) \quad 11$$

La expresión anterior es el potencial medido en un espacio homogéneo con un arreglo tetraelectrónico como se muestra en la Figura 4.

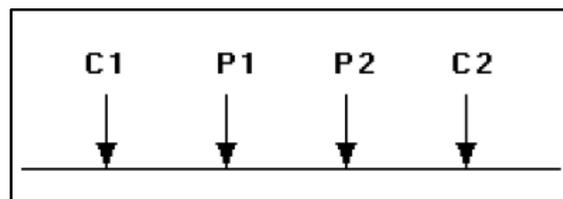


Figura 4: Arreglo tetraelectrónico de dos electrodos de inyección de corriente (C1 y C2) y dos electrodos de medición de potencial (P1 y P2). Extraído de Loke (2004).

Por lo tanto el valor de la resistividad se puede calcular como:

$$\rho = k \frac{\Delta\varphi}{I} (\Omega/m) \quad 12$$

$$\text{Donde } k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{1p1}} - \frac{1}{r_{2p1}} - \frac{1}{r_{1p2}} + \frac{1}{r_{2p2}}\right)}$$

K se le denomina factor geométrico y depende de la disposición de los electrodos (Loke, 2004).

2.2 Resistividad aparente

La expresión (12) fue deducida para un medio homogéneo e isótropo y en ese caso se podría hallar la resistividad verdadera del medio. Sin embargo, las mediciones son realizadas en medios no homogéneos y por lo tanto la resistividad que se obtiene para el mismo esquema de electrodos es la resistividad aparente.

$$\rho_a = k \frac{\Delta\varphi}{I} \quad 13$$

La resistividad aparente hace alusión al valor de resistividad que permite diferenciar una anomalía de un medio homogéneo e isótropo. Por lo tanto, las mediciones de campo son resistividades aparentes y las resistividades reales son las obtenidas luego de haber realizado un proceso de inversión de los datos.

2.3 Arreglos electródicos

Cuando se tiene un arreglo tetraelectródico como se observa en la Figura 5, el cálculo de la resistividad en función de la ecuación (12) es:

$$\rho = \frac{2\pi\Delta\varphi_{P_1P_2}}{I} \left\{ \left[\frac{1}{C_{1P_1}} - \frac{1}{P_1C_2} \right] - \left[\frac{1}{C_{1P_2}} - \frac{1}{P_2C_2} \right] \right\}^{-1} \quad 14$$

Como se mostró anteriormente, para el arreglo mostrado en la Figura 5, el factor geométrico se define como:

$$K = 2\pi \left\{ \left[\frac{1}{C_{1P_1}} - \frac{1}{P_1C_2} \right] - \left[\frac{1}{C_{1P_2}} - \frac{1}{P_2C_2} \right] \right\}^{-1} \quad 15$$

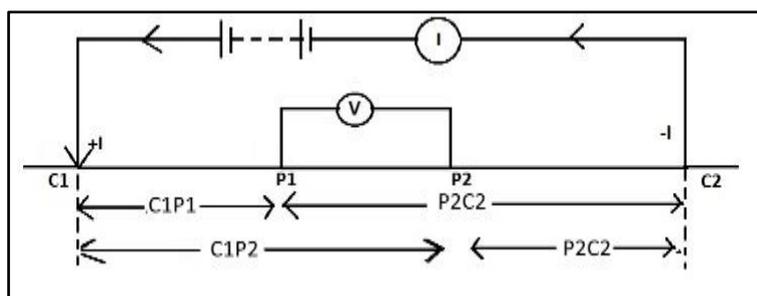


Figura 5: Arreglo tetraelectródico para medición eléctrica. Fuente: Extraído de Reynolds (1997).

Se puede notar que los valores de resistividad dependen de la geometría del arreglo a través del factor geométrico K. Cualquier arreglo tetraelectródico es un arreglo electródico y puede emplearse en función de las características particulares de la subsuperficie.

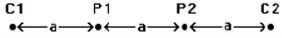
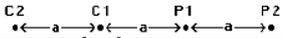
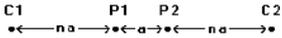
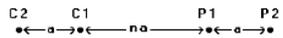
Los arreglos electródicos más empleados son:

- Wenner (Alpha, Beta y Gamma)
- Wenner Schlumberger

- Dipolo Dipolo
- Polo-polo
- Polo Dipolo

En la Tabla 1 se muestran los esquemas y las constantes geométricas de estos diferentes arreglos.

Tabla 1: Esquemas y constantes geométricas de diferentes arreglos electródicos. (Modificado de Loke, 2004)

Wenner Alpha , $k=2\pi a$ 	Wenner Beta , $k=6\pi a$ 	Wenner Gamma , $k=3\pi a$ 
Wenner Schlumberger , $k= \pi n(n+1)a$ 	Dipolo Dipolo , $k= \pi n(n+1)(a+2)a$ 	Polo-polo , $K=2\pi a$ 
Polo Dipolo , $K=2\pi n(n+1)a$ 		

En función de la sensibilidad que presenta cada arreglo, cada uno de los arreglos presenta mejor capacidad para representar ciertas formas de las estructuras subterráneas (Loke, 2004). Este análisis se realiza con mayor detalle en el capítulo 2.4

2.4 Profundidad de Investigación

Una pseudo sección eléctrica es una representación de los datos de resistividad observados en el campo, distribuidos en una imagen en función de las coordenadas espaciales X y Z. La coordenada Z es la pseudo profundidad, ya que la verdadera no se conoce, sino hasta que se hace la inversión de los datos. Sin embargo, una pseudo sección permite realizar una interpretación de carácter cualitativo, pues la distribución de la resistividad muestra la localización de las diferentes estructuras o cuerpos en el semiespacio. Generalmente las coordenadas del valor de resistividad aparente medido se atribuyen al punto medio de los dipolos empleados para la medición y la profundidad se le asigna en función de la separación entre electrodos.

En un principio el cálculo de la profundidad de investigación fueron reglas empíricas en función de la geometría del arreglo. Sin embargo, en la actualidad se emplea la ecuación propuesta por Edwards (1977) y posteriormente modificada por Barker (1989) y Loke (2010) que la fundamentó en la función de sensibilidad para un semiespacio

Loke (2010), plantea emplear la función de sensibilidad o derivada de Frechet (McGillivray and Oldenburg 1990) para determinar la profundidad de investigación de un arreglo electródico para un semiespacio homogéneo. La función de sensibilidad expresa el grado en el que un cambio de resistividad influenciará en la medición del potencial para un arreglo dado. A mayor valor de función de sensibilidad, mayor será la influencia de la región en superficie en la medición.

Loke y Barker (1995), plantean que el cambio de potencial debido a un cambio de resistividad $\delta\rho$ en un pequeño volumen del medio subterráneo en un arreglo polo-polo en un medio homogéneo es:

$$\delta\varphi = \frac{\delta\rho}{\rho^2} \int_V \nabla\varphi \cdot \nabla\varphi' d\tau \quad 16$$

Donde el potencial $\varphi = \frac{\rho}{2\pi(x^2+y^2+z^2)^{0.5}}$

El potencial $\varphi' = \frac{\rho}{2\pi((x-a)^2+y^2+z^2)^{0.5}}$ es el potencial medido debido a la colocación del electrodo de inyección de corriente en P1.

Si se considera una medición en 1D, la función de sensibilidad (ecuación 17) nos queda:

$$F_{1D}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(x-a)+y^2+z^2}{[x^2+y^2+z^2]^{1.5}[(x-a)^2+y^2+z^2]^{1.5}} dx dz \quad 17$$

La ecuación (17) tiene la solución desarrollada por Roy and Apparao (1971):

$$F_{1D}(z) = \frac{2}{\pi} \frac{z}{[a^2+4z^2]^{1.5}} \quad 18$$

En la Figura 6 se muestra la función de sensibilidad para un arreglo polo-polo a partir de la expresión 18. Algunos autores emplean el máximo de la función de sensibilidad, aunque Edwards (1977) y Barker (1989) plantean que la profundidad media de investigación es un parámetro más robusto. Esta profundidad media de investigación se obtiene como el punto en el que el área bajo la curva es igual a la mitad del área total, significa que el 50% de la corriente circula por encima de dicho punto y el otro 50% por debajo. Desde el punto de vista matemático, representa que:

$$\int_0^{z_e} F_{1D}(z) dz = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} F_{1D}(z) dz \quad 19$$

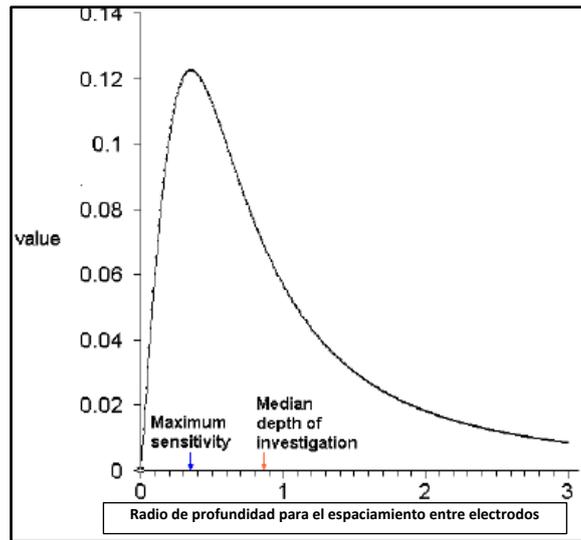


Figura 6: Función de sensibilidad 1-D para el arreglo Polo-polo. Fuente Loke (2004)

Loke (2004) calcula la profundidad media de investigación a partir de la expresión 19 considerando la contribución de los cuatro pares de electrodos según corresponda para cada arreglo. La profundidad media de investigación está en función de la separación entre electrodos (a) o el largo total de la medición (L) a partir de la función de sensibilidad expresada anteriormente para las disposiciones de electrodos más empleadas (Tabla 2). Sin embargo, se puede calcular para cualquier arreglo como (Tejero et al., 2015):

$$K = 2 \left[\frac{1}{\sqrt{AM^2 + U}} - \frac{1}{\sqrt{BM^2 + U}} - \frac{1}{\sqrt{AN^2 + U}} + \frac{1}{\sqrt{BN^2 + U}} \right] \quad 20$$

Donde

$$K = \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] y \quad U = 4Z_e^2 \quad 21$$

Z_e corresponde a la profundidad media de investigación.

Tabla 2: Profundidad media de investigación (Z_e) en función de la separación entre electrodos (a) y el largo de la medición (L). También se incluye el factor geométrico K según el arreglo y el factor inverso geométrico. Extraído de Loke (2004).

	Z_e/a	Z_e/L	Factor geométrico
Wenner Alpha	0.519	0.173	6.2832
Wenner Beta	0.416	0.139	18.850
Wenner Gamma	0.594	0.198	9.4248
Dipolo Dipolo n=1	0.416	0.139	18.850
n=2	0.697	0.174	75.398
n=3	0.962	0.192	188.50
n=4	1.220	0.203	376.99
n=5	1.476	0.211	629.73
n=6	1.730	0.216	1055.6
n=7	1.983	0.220	1583.4
n=8	2.236	0.224	2261.9
Ecuatorial Dipolo Dipolo n=1	0.451	0.319	21.452
n=2	0.809	0.362	119.03
n=3	1.180	0.373	367.31
n=4	1.556	0.377	841.75
Wenner Schlumberger n=1	0.519	0.173	6.232
n=2	0.925	0.186	18.850
n=3	1.318	0.189	37.699
n=4	1.706	0.190	62.832
n=5	2.093	0.190	94.248
n=6	2.478	0.191	131.95
n=7	2.863	0.191	175.93
n=8	3.247	0.191	226.19
n=9	3.632	0.191	282.74
n=10	4.015	0.191	345.58
Polo Dipolo n=1	0.519	0.296	12.566
n=2	0.925	0.30	37.699
n=3	1.318	0.330	75.398
n=4	1.706	0.341	125.66
n=5	2.093	0.349	188.50
n=6	2.478	0.354	263.89
n=7	2.863	0.358	351.86
n=8	3.247	0.361	452.39
Polo-polo	0.867		6.28319

Para evaluar la profundidad media de investigación, las tablas son muy convenientes pero si se requiere realizar programación, se debe emplear la función de sensibilidad o en su defecto las expresiones (20) y (21) para cada caso.

A continuación se realiza un resumen de las características de los arreglos electródicos más empleados debido a la función de sensibilidad y como incide en los resultados obtenidos para cada uno de ellos. Para mayor detalle de la función de sensibilidad de cada arreglo se puede consultar en Loke (2004)

Wenner

En el caso del Wenner Alpha, el mismo presenta contornos casi horizontales en el centro de la sección. Esto genera que el arreglo sea más sensible a cambios verticales (estructuras horizontales) que a cambios horizontales (estructuras verticales). Tiene una moderada

profundidad de investigación respecto a otros arreglos aunque presenta señal más fuerte. Sin embargo, tiene una pobre cobertura horizontal al aumentar el espaciamiento de los electrodos.

Wenner Schlumberger

Para el caso del arreglo Wenner Schlumberger empleado, el aumento en la profundidad de observación se obtiene de manera alternada aumentando el factor "n" y la distancia "a". Los mayores valores de sensibilidad en el centro del arreglo aumentan su concentración a medida que el factor n aumenta y en n=6 los mayores valores cerca de C1 y C2 se alejan de los que se encuentran cercanos a P1 y P2. Por lo tanto este arreglo es moderadamente sensible tanto a estructuras horizontales como verticales. La profundidad media de investigación es 10% mayor que para Wenner aunque la fuerza de la señal es menor. La cobertura horizontal de este arreglo es mayor respecto a Wenner.

Dipolo Dipolo

Este arreglo se ha empleado mucho en mediciones de resistividad e IP debido al bajo acoplamiento electromagnético entre los circuitos de corriente y potencial. Las secciones de sensibilidad muestran que los mayores valores de sensibilidad se encuentran entre los pares C1-C2 y P1-P2. Esto indica que el arreglo es más sensible a cambios de resistividad debajo de cada par. Para valores altos de n la sensibilidad se vuelve muy baja. Para valores de n mayores a 2, los patrones de la sensibilidad se vuelven verticales, por lo que indica que este arreglo es muy sensible a cambios horizontales de resistividad (estructuras verticales). Este arreglo tiene mayor cobertura horizontal respecto al arreglo Wenner. En términos generales este arreglo tiene menor profundidad de investigación que el arreglo Wenner y Loke (2004), plantea que este arreglo subestima en un 20% a 30% la profundidad media de investigación mediante la función de sensibilidad respecto a la profundidad de las estructuras. Otra desventaja que presenta este arreglo es la baja fuerza de la señal de potencial medible para valores de n grandes. Por ejemplo, el voltaje disminuye 56 veces cuando n pasa de 1 a 6. Por lo expuesto anteriormente, para realizar mediciones con el arreglo dipolo dipolo el equipo empleado debe tener una buena sensibilidad y se debe asegurar un buen contacto tierra-electrodo.

Polo-polo

Este arreglo en la práctica no existe y por lo tanto para simular este arreglo, los electrodos C2 y P2 se deben colocar a una distancia de al menos 20 veces de la separación C1-P1. Esto genera que muchas veces se vuelva una disposición de electrodos poco práctica para implementar y el ruido telúrico que genera la separación entre P1 y P2 disminuye la calidad de los datos. Este arreglo ha sido utilizado en estudios arqueológicos debido a la poca separación requerida entre C1-P1 y en arreglos 3D. Si bien este arreglo tiene la mayor cobertura horizontal y profundidad de investigación, tiene la peor resolución debido a la gran separación entre las zonas de sensibilidad.

Polo-Dipolo

Este arreglo tiene mayor cobertura horizontal, mayor fuerza de señal que el arreglo dipolo dipolo y bajo ruido telúrico respecto al arreglo polo-polo. Sin embargo, es un arreglo asimétrico que puede generar problemas al momento de la interpretación del modelo obtenido. Esto se puede corregir realizando las mediciones en una dirección y en la inversa para obtener un modelo simétrico. Este arreglo, al igual que el polo-polo, requiere de la colocación del electrodo C2 alejado de la línea de medición. Sin embargo, este arreglo se ve afectado en menor medida de la distancia entre C2 y C1 respecto al arreglo Polo-polo.

2.4.1 Tomografía Eléctrica

En la naturaleza, las estructuras en el medio subterráneo generalmente son cuerpos que presentan variaciones laterales y verticales. Por este motivo, en la mayoría de los casos, suponer un modelo de capas plano paralelas puede ser insuficiente para obtener una correcta interpretación del medio investigado. Para poder evaluar estas estructuras se han desarrollado técnicas geoelectricas que permiten visualizar estas variaciones laterales y verticales. La tomografía de resistividad eléctrica (ERT) permite realizar mediciones tanto en 2D como en 3D. Dahlin (2001), establece que la adquisición de datos se realiza mediante un dispositivo compuesto por un resistivímetro, una unidad conmutadora, una computadora, cables de electrodos con varios conectores y electrodos, un esquema del dispositivo para mediciones de ERT2D se muestra en la Figura 7. Para la interpretación, los datos medidos deben ser invertidos de manera automática mediante la implementación de algoritmos matemáticos (Loke and Barker, 1996).

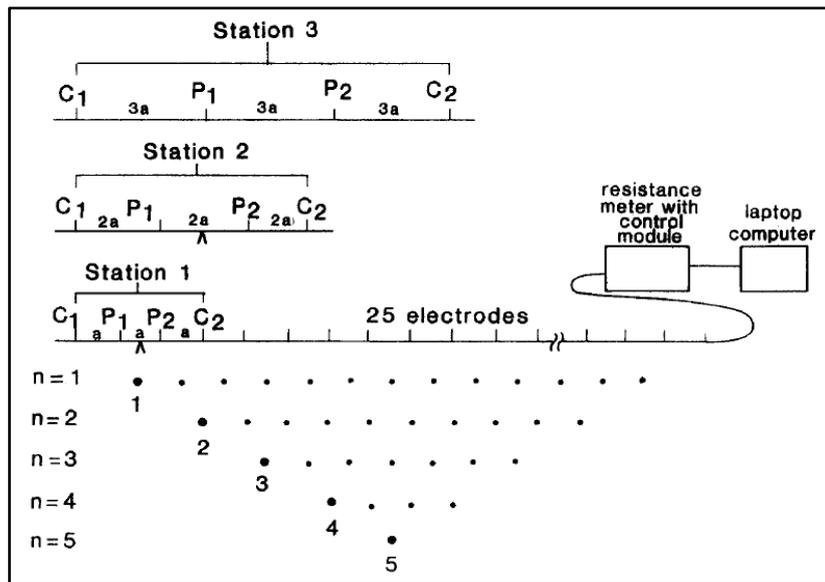


Figura 7: Esquema de medición de ERT2D en campo. Extraído de Griffiths and Barker (1993).

2.4.1.1 Tomografía de Resistividad Eléctrica en 2D

En muchos casos, se puede asumir que no existen variaciones perpendiculares a la línea de medición en las propiedades geoelectricas de los cuerpos. Por lo tanto, la técnica de ERT2D es un método geofísico en corriente continua que permite investigar de manera continua la variación de la resistividad del subsuelo en profundidad y lateralmente (Griffiths and Baker, 1993).

2.4.1.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica en 3D

Como se mencionó anteriormente, las estructuras geológicas son cuerpos en tres dimensiones. Por lo tanto, lo más acertado sería realizar modelos en 3D para poder representar estas estructuras. Sin embargo, las tomografías en 3D aún están en desarrollo.

Existen diversas formas de realizar mediciones de ERT en 3D. Entre ellas se encuentran las grillas cuadradas donde la separación de electrodos en la dirección x es igual que en la dirección y. Otro método de colecta de datos 3D es la de líneas paralelas. En este caso hay que tener presente que la separación entre líneas no puede ser mayor a dos veces la separación entre electrodos dentro de cada línea. Esto depende fundamentalmente de la sensibilidad del arreglo electrodico empleado y su cobertura en los bordes Loke (2004).

La disposición de electrodos más empleadas en mediciones 3D son Polo-Polo, Polo-Dipolo y Dipolo-Dipolo aunque cualquier disposición de electrodos se puede aplicar según convenga en cada caso.

También existen arreglos de electrodos en 3D no convencionales como por ejemplo en L (Tejero et al., 2015). Este tipo de disposición es necesario cuando en superficie existen estructuras que no permite disponer los electrodos de manera continua.

2.5 Teoría de la Inversión

Cuando se realiza la inversión geoelectrica se busca obtener un modelo de resistividades reales que permita reproducir los valores de resistividad aparente medidas en campo. Para modelos 2D y 3D la inversión se puede realizar mediante diferencias finitas (Dey y Morrison, 1979a, 1979b) o elementos finitos (Silvester y Ferrari, 1990).

El proceso es iterativo a partir de un modelo inicial y busca reducir la diferencia entre los valores simulados y medidos. La diferencia entre estos valores se calcula a partir de la suma de las diferencias al cuadrado. Esto se puede calcular como:

$$E = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad 22$$

Para reducir el error, se emplea la ecuación de Gauss Newton para determinar el cambio a realizar en las resistividades del modelo. La expresión es:

$$J^T J \Delta_{qi} = J^T g \quad 23$$

Donde J es la matriz jacobiana de derivadas parciales y Δ_{qi} es el vector de cambio de los parámetros del modelo. Por lo tanto el valor de la resistividad en el paso k+1 será:

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad 24$$

En muchos casos el producto $J^T J$ es singular y por lo tanto Δ_{qi} no tiene solución. Por lo tanto, se puede emplear un factor damping para evitar esto y limitar el rango de valores del vector de cambio Δq_k . Por lo tanto se puede emplear la ecuación (Inman 1975):

$$(J^T J + \lambda I) \Delta_{qi} = J^T g \quad 25$$

Esta metodología tiene el inconveniente de generar zonas de resistividades anómalas cuando el modelo tiene muchos parámetros o celdas en 2D y 3D (Constable et al., 1987). Por lo tanto para evitar esto, a la expresión anterior se le realizó una modificación (Ellis y Oldenburg, 1994a):

$$(J^T J + \lambda F) \Delta_{qk} = J^T g - \lambda F q_k \quad 26$$

Donde $F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z$

Donde C_x, C_y, C_z son las matrices de suavizamiento en las direcciones x, y, z y $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ son los pesos de los filtros de suavizamiento en cada dirección.

2.6 Polarización Inducida

La polarización inducida (IP por sus siglas en inglés) fue descubierta por Schlumberger en 1912 y fue utilizada por Keck y David en la segunda guerra mundial para detectar minas en el mar. En la década de 1960, su uso se popularizó en el estudio de depósitos de sulfuros debido a la importante respuesta de los minerales asociados. En las últimas décadas ha aumentado su uso en aspectos ambientales, biogeofísica y estado bioquímico del medio subterráneo (Kemna et al., 2012).

La polarización se define como el momento dipolar por unidad de volumen y la IP como el momento dipolar de la corriente por unidad de volumen (Sherif, 2002). Por otro lado, Wong (1979) define la IP como la dispersión en bajas frecuencias de la conductividad o resistividad eléctrica entre los materiales de la tierra y el agua que se encuentra en contacto.

Mientras que la resistividad eléctrica del suelo es controlada básicamente por la conductividad eléctrica de los fluidos que rellenan los poros, la IP está fuertemente afectada por procesos en la interfaz entre el fluido y los granos del suelo (Binley y Kemna, 2005). Debido a que la IP considera la resistividad y la polarizabilidad del suelo, al menos en teoría, la IP debería brindar información adicional sobre la litología y química de los granos del suelo. Si bien existen diversas formas de obtener mediciones de IP, como se verá luego en este capítulo, Slater y Lesmes (2002) demostraron que las mediciones se pueden normalizar para obtener los parámetros de IP que dependen solamente de los espacios de poros, donde se incluye la química del fluido y/o el contenido de agua, junto con información de la litología.

Sogade (2006), propone que el fenómeno de IP es causado por el transporte y acumulación reversible de iones y electrones en materiales micro heterogéneos debido a un campo eléctrico externo. Plantea que las superficies de la mayoría de los sólidos usualmente poseen una carga neta por adsorción de iones. La carga neta es una capa muy delgada y constituye lo que es la capa fija. La superficie de carga neta en el sólido es una propiedad medida por la capacidad de intercambio iónico y atrae cargas de polaridad opuesta para formar una capa difusa. Esta capa presenta impedancia capacitiva para el pasaje de la corriente a través de la interfaz sólida. El efecto IP está vinculado al exceso de cargas cuando los conductos de los poros están bloqueados o cuando el movimiento de las cargas se enlentecen

Los procesos más importantes que influyen en IP, son adsorción (solutos se adhieren a la superficie de un sólido mediante medios físicos o químicos), intercambio iónico (atracción entre iones del fluido y las arcillas minerales del suelo), sorción química (el soluto es incorporado a la estructura de un sedimento o roca) y absorción (el soluto se difunde en la matriz del sedimento o roca) (Sogade, 2006).

Dentro de los métodos eléctricos se considera que es un método de fuente controlada ya que se requiere inyectar corriente. Se emplean las mismas disposiciones de electrodos que en el apartado 2.3 donde se incluyen los arreglos electródicos más empleados en levantamiento geoelectrónico. Sin embargo, los electrodos que se recomiendan emplear son no polarizables (de cobre de alta pureza) para favorecer mediciones más precisas y evitar el ruido introducido por la polarización de los electrodos metálicos, como establece Kemna et al. (2012). Estos autores también recomiendan colocar el electrodo en sustancia electrolítica de sulfato de cobre (CuSO_4) con el mismo objetivo. El procedimiento de obtención de datos es el mismo que el de geoelectrónica. Se inyecta una corriente hasta generar un campo estacionario. Sin embargo, la medición de la polarización inducida se realiza cuando se deja de inyectar la corriente. Cuando se apaga la corriente, la caída de potencial entre los dos electrodos conlleva un tiempo debido a que el medio subterráneo se cargó temporalmente al inyectar corriente (se polarizó) y actúa como si fuera un capacitor.

La curva de decaimiento de voltaje en el tiempo depende de factores geológicos. En la Figura 8 se muestra una curva obtenida mediante medición de polarización inducida.

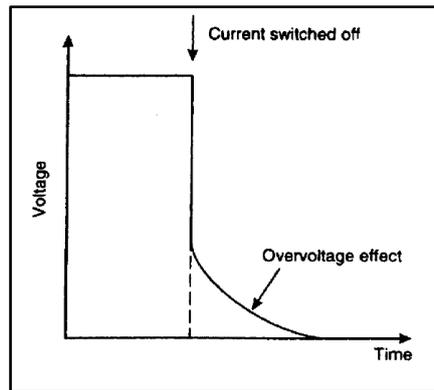


Figura 8: Efecto de sobrevoltaje debido a polarización inducida. Fuente Reynolds (1977)

2.6.1 Tipos de Polarización

Existen básicamente 5 tipos de polarización a frecuencias menores a 1MHz (Kemna et al., 2012). Ellos son:

- Polarización de Maxwell-Wagner
- Polarización de la capa de Stern
- Polarización de la capa difusa
- Polarización electrónica
- Polarización de membrana

2.6.1.1 Polarización de Maxwell-Wagner

La polarización de Maxwell Wagner es una polarización interfacial debido a la discontinuidad del desplazamiento de las corrientes en un sistema multifase con discontinuidades de la permitividad dieléctrica y/o la conductividad eléctrica en la interfaz de las diferentes fases.

El resto de los tipos de polarización están controlados por el movimiento de las cargas.

2.6.1.2 Polarización de la capa de Stern

La polarización de la capa de Stern se da en la parte interior de la doble capa eléctrica (EDL, por sus siglas en inglés) en la interfaz entre los minerales y agua. En este caso, la polarización iónica está fuertemente relacionada con la ocurrencia de la EDL y por lo tanto, la capa de Stern y difusa pueden polarizar según la conectividad de la fase sólida.

Por otro lado, La polarización electrónica o la de membrana son mecanismos que explican los efectos de IP a frecuencias menores a 1KHz.

2.6.1.3 Polarización Electrónica

Cuando se inyecta corriente eléctrica en el suelo se genera un alineamiento de los electrones en la superficie de los granos del suelo. Los minerales tienen la mayor respuesta a la polarización inducida porque tienen mayor superficie específica respecto a otros granos. Los gases nobles son los únicos elementos no polarizables. Luego de cortar la corriente, estas cargas sobre la superficie se dispersarán para reestablecer el equilibrio. En la Figura 9 se muestra un esquema de polarización electrónica.

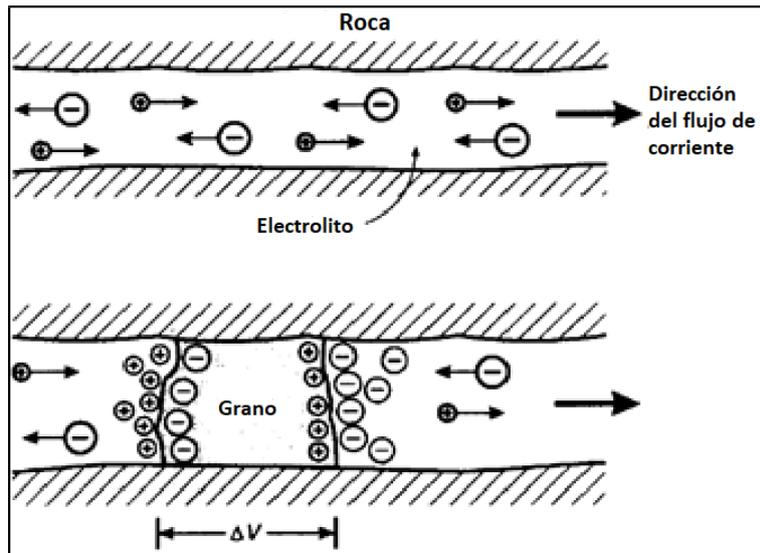


Figura 9: Polarización electrónica o de grano. (a) flujo electrónico sin restricción en un conducto. (b) polarización de un grano conductivo electrónicamente, bloqueando un canal. Fuente Reynolds, 1997).

2.6.1.4 Polarización de Membrana

La polarización de membrana se da fundamentalmente por dos causas. Una de ellas es la constricción de los canales de los poros y la otra es la presencia de arcillas entre los conductos. La diferencia de la fracción de cationes y aniones a ambos lados del medio debido a la aplicación de un campo eléctrico externo genera que luego de que la corriente se corta, el decaimiento se da por difusión. Este tipo de polarización ocurre en suelos con cierto contenido de arcillas debido a la capacidad de intercambio iónico que bloquea parcialmente la trayectoria de la solución. La polarización de membrana sucede a bajas frecuencias y su constante de tiempo está controlado por la movilidad de los iones en solución y el tamaño de los poros. En la Figura 10 se muestra un esquema de polarización de membrana.

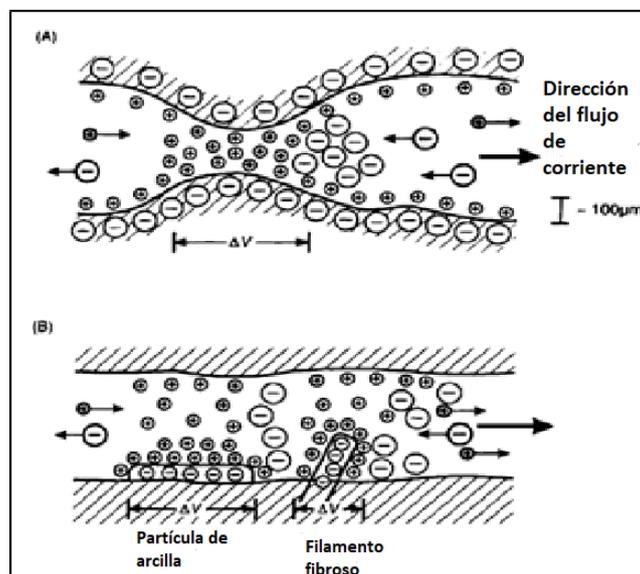


Figura 10: Polarización de membrana. (a) Contracción de conducto. (b) polarización entorno a arcillas y filamentos fibrosos. Fuente Reynolds, (1997).

Sogade (2006) plantea que la polarización de membrana es el mecanismo más observable en la cartografía de contaminantes. Este autor plantea que la literatura es consistente en que las mejores respuestas se dan a frecuencias menores a 1 KHz (Madden y Cantwell, 1967, Vanhala, 1997a, b). Para dominio del tiempo esto corresponde a períodos mayores a 1 ms.

2.6.2 Teoría electromagnética de la Polarización Inducida

El campo electromagnético está relacionado con los parámetros del medio como la conductividad (σ), la permitividad (ε) y la permeabilidad magnética (μ) a través de la constante de propagación (López, A. 2014):

$$\begin{aligned} k^2 &= w^2 \varepsilon(w) \mu + iw \sigma(w) \mu = iw \mu \sigma(w) \left(1 - \frac{iw \varepsilon(w)}{\sigma(w)} \right) = iw \mu \hat{\sigma} & 27 \\ &= w^2 \mu \varepsilon(w) \left(1 - \frac{\sigma(w)}{iw \varepsilon(w)} \right) = w^2 \mu \hat{\varepsilon} \end{aligned}$$

Donde $\hat{\sigma}$ y $\hat{\varepsilon}$ son la conductividad compleja y la permitividad compleja respectivamente. Se puede definir la admitividad compleja como:

$$\gamma = \sigma(w) - iw \varepsilon(w) \quad 28$$

Para la mayoría de las aplicaciones geo-electromagnéticas la admitividad puede considerarse independiente de la frecuencia debido a que las corrientes de desplazamiento son despreciables. En el dominio del tiempo también se puede asumir lo antes mencionado.

Sin embargo, para el caso de IP existen variaciones temporales que se detallarán a continuación.

Las ecuaciones de Maxwell nos permiten describir los fenómenos existentes en los medios geoelectrónicos, los cuales son considerados en general como sistemas invariantes en el tiempo y su relación con el campo electromagnético de un medio dispersivo.

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \text{ Ley de Faraday} \quad 29$$

$$\nabla \times H = J + \frac{dD}{dt} \text{ Ley de Ampere Maxwell} \quad 30$$

$$\nabla \cdot D = q \text{ Ley de Gauss para campo eléctrico} \quad 31$$

$$\nabla \cdot B = 0 \text{ Ley de Gauss para campo magnético} \quad 32$$

Donde E [$LMT^{-3}I^{-1}$] y B [$MT^{-2}I^{-1}$] son los vectores de campo eléctrico y magnético respectivamente, D [$L^{-2}TI$] y H [$L^{-1}I$] son los vectores de inducción eléctrica y magnética y q es la densidad de carga. La ecuación 30 nos indica que en un medio existen las corrientes de conducción y las de desplazamiento, donde J es el vector de densidad de corriente [$L^{-2}I$]

A su vez, podemos relacionar las propiedades físicas del medio con los vectores:

$$J(r, t) = \sigma(r, t) * E(r, t) \quad 33$$

$$D(r, t) = \varepsilon * E \quad 34$$

$$B(r, t) = \mu H \quad 35$$

Donde $*$ es la convolución de las funciones y ε es la permitividad o constante dieléctrica [$L^{-3}M^{-1}T^3I^2$], μ es la permeabilidad magnética [$LMT^{-2}I^{-2}$].

Sin embargo, en las ecuaciones de Maxwell el fenómeno de IP no es evidente y fue incluido por Kormiltsev en 1989 (Kamenetsky et al., 2010) empleando la integral de Duhamel donde aplica la derivada temporal de la integral de convolución donde se incluye la componente del campo eléctrico con la función posterior al corte de inyección de corriente. López (2014) muestra que la ecuación de las corrientes de desplazamiento eléctrico se puede expresar como:

$$J_d(t) = \varepsilon(0) \frac{d}{dt} E(t) + \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \Big|_{\tau=0} E(t) + \int_0^t E(\lambda) \frac{d^2 \varepsilon(t-\lambda)}{d(t-\lambda)^2} d\lambda \quad 36$$

En la expresión anterior se puede observar que en medios no dispersivos, existen corrientes de desplazamiento proporcionales a la primera y segunda derivada de la permitividad. Según López (2014), debido a que el cambio en la permitividad es lo suficientemente lento con el tiempo, la segunda derivada de la permitividad se puede despreciar, obteniendo:

$$J_d(t) = \varepsilon(0) \frac{d}{dt} E(t) + \left. \frac{d\varepsilon(t)}{dt} E(t) \right|_{\tau=0} \quad 37$$

La ecuación anterior muestra que se tienen corrientes de desplazamiento eléctrico que en la teoría clásica de campos electromagnéticos no se consideran. Estas corrientes existen para tiempos menores a 10 μ s (López, 2014).

Si se considera el campo eléctrico como una función escalón, obtenemos que las corrientes totales serán:

$$J_t(t) = J_c(t) + J_d(t) = \sigma(t)Eu(t) + \frac{d\varepsilon(t)}{dt} Eu(t) \quad 38$$

O lo que es lo mismo:

$$J_t(t) = \left(\sigma(t) + \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right) Eu(t) \quad 39$$

Realizando una analogía con la ley de Ohm, se puede obtener una conductividad variable en el tiempo como:

$$\bar{\sigma}(t) = \sigma(t) + \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad 40$$

Por lo tanto, los parámetros conductividad y permitividad son dependientes del tiempo en medios dispersivos.

Cuando se ha alcanzado el estado estacionario del campo eléctrico, la conductividad del medio que se mediría no es la verdadera del medio ya que está modificada, como lo indica la ecuación (40). Sin embargo, dada la complejidad para determinar $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$, se define un parámetro que es la cargabilidad (μ), la cual ha disminuido a la conductividad real del medio, es decir:

$$\sigma(t) = \sigma_o(1 - \mu) \quad 41$$

Donde σ_o es la conductividad del medio y μ la cargabilidad.

Seigel (1959) propone una ecuación para encontrar la cargabilidad μ para un medio homogéneo e isótropo y un arreglo electródico arbitrario como la relación entre el máximo del voltaje secundario y el primario (al momento de la interrupción del campo), esto es:

$$\mu = \frac{\varphi' - \varphi}{\varphi'} \quad 42$$

Donde $\varphi = \frac{I}{\sigma} F$ es la diferencia de potencial entre dos puntos medidos al insertar una corriente I en un medio homogéneo en ausencia de efectos de polarización. F es una función de la forma del cuerpo considerado y el arreglo de los electrodos.

Mientras que $\varphi' = \frac{I}{\sigma(1-\mu)} F$ es en la presencia de los dipolos.

Esta cargabilidad es la cargabilidad instantánea al momento de la interrupción de la corriente. Sin embargo, en la práctica esta cargabilidad instantánea no es posible de medir debido a que solo es posible medir diferencias de potencial. Por lo tanto se define la cargabilidad como (López, 2014):

$$\mu = \frac{\int \frac{d\phi}{dx} dt}{\int \frac{d\phi(t)}{dt} dt} \approx \frac{\int \frac{\Delta\phi(t)}{a} dt}{\int \frac{\Delta\phi(t)}{a} dt} \quad 43$$

Donde a es la abertura del dipolo en la línea de observación. Por lo tanto la cargabilidad se puede calcular como:

$$\mu = \frac{\int \Delta\phi(t) dt}{\int \Delta\phi(t)_{t=\infty} dt} \quad 44$$

Lo que es análogo a decir que $\mu = \frac{V_s}{V_{DC}}$, donde V_s es el voltaje en el instante posterior a cortar la corriente y V_{DC} es el voltaje previo a cortar la corriente. En la Figura 11 se muestra el comportamiento del potencial en el tiempo. Debido a que V_s es difícil de medir, se aplica una integral para determinar la cargabilidad.

$$\mu = \frac{1}{(t_2 - t_1)V_p} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad [mV/V] \quad 45$$

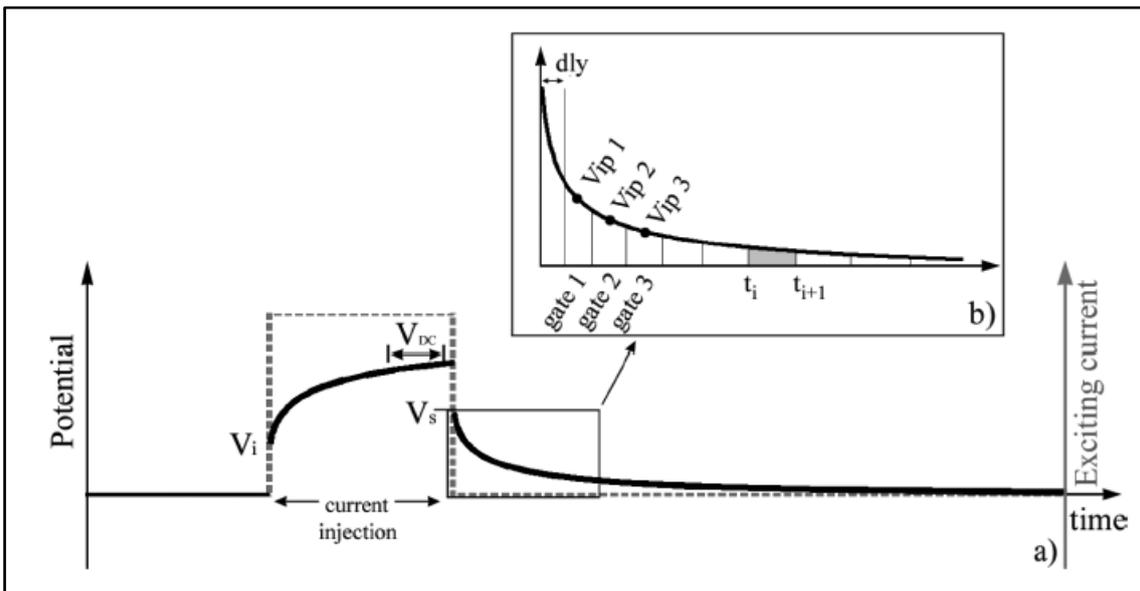


Figura 11: Medición en el dominio del tiempo. Fuente Gazoty et al., (2012)

Cole y Cole (1941) propusieron un modelo de manera de predecir el complejo comportamiento dieléctrico de relajación. En la Figura 12 se muestra el circuito análogo a un modelo de un poro en una roca mineralizada. En el circuito, la impedancia $(i\omega X)^{-c}$ simula la interfaz iónica metálica. La resistencia R_o simula los conductos interconectados entre poros y la resistencia R_1 simula la resistencia de la solución en el conducto bloqueado.

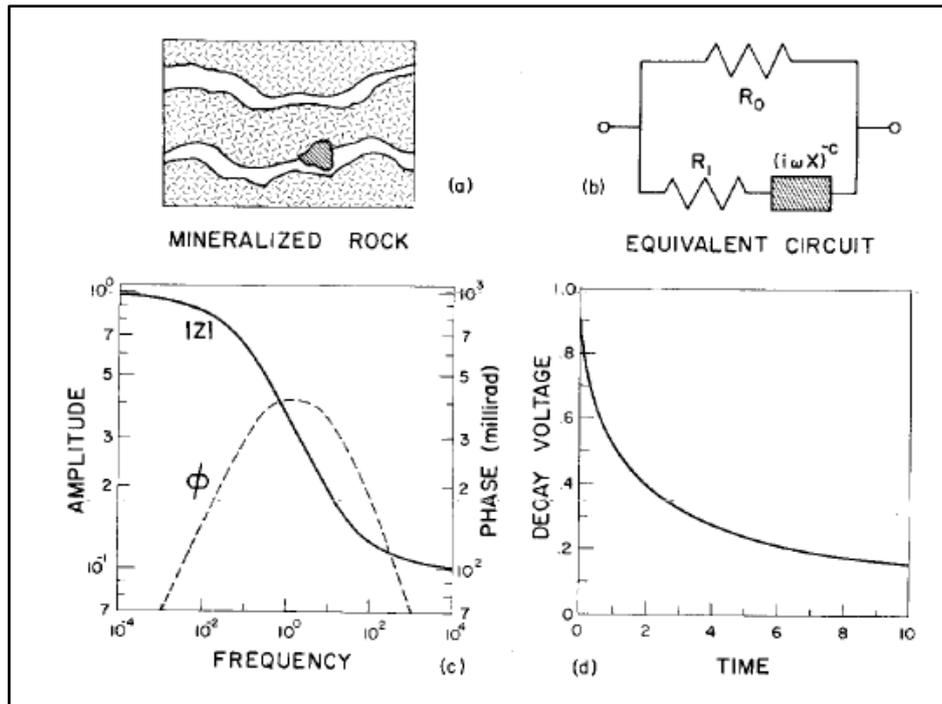


Figura 12: (a) Sección de una roca mineralizada que presenta conductos bloqueados y no bloqueados. (b) Circuito equivalente para la roca mineralizada. (c) Respuesta en el dominio de frecuencia típica para el circuito equivalente (d) Respuesta en el dominio de tiempo correspondiente a la frecuencia en (c). Fuente Pelton (1978).

La impedancia del circuito equivalente es:

$$Z(\omega) = R_o \left[1 - \mu \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega X)^c} \right) \right] \quad 46$$

Donde: $\mu = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_o}}$ y $\tau = X \left(\frac{R_o}{\mu} \right)^{1/c}$

- τ (s) es la constante de tiempo y determina el tiempo requerido en el dominio del tiempo.
- c es la dependencia de la frecuencia

2.6.3 Mecanismos de medición de IP. Dominio de Tiempo y Frecuencia

Los dos mecanismos más empleados para medir polarización inducida son el dominio de tiempo y el de frecuencia.

2.6.3.1 Dominio del Tiempo

Al apagar la corriente luego de haberse establecido el campo estacionario se genera un voltaje residual de decaimiento (Figura 11). El voltaje total observado (V_{DC}) es igual a la suma del voltaje debido a la corriente (V_i) más el voltaje debido a la polarización (V_s)

$$V_{DC} = V_i + V_s \quad 47$$

Para medir el voltaje en el dominio del tiempo luego de cortar la corriente, se mide en lapsos de tiempos fijos. Si bien se miden tiempos discretos se puede realizar una interpolación entre los puntos para obtener la curva de decaimiento del voltaje.

Gazoty et al. (2012) establecen que existen diferentes formas de establecer los lapsos de tiempo, como puede ser que aumente de manera logarítmica (Christiansen et al., 2006). Sin embargo, esto aumenta el ruido de la señal. Por el contrario, si la distribución se realiza de manera lineal, el ruido de la señal decrecerá. Los mismos autores plantean que el estudio en dominio del

tiempo es un método simple y robusto cuando se aplican sistemas de adquisición multicanal. Plantea que usar solamente la integral de cargabilidad es muy restrictivo y que se debe emplear la curva entera de decaimiento. En este sentido, mencionan que Fiandaca et al. (2012), plantean un algoritmo para emplear la curva entera de decaimiento y poder extraer los cuatro parámetros Cole Cole.

La integral sobre n lapsos de tiempo para obtener la cargabilidad μ en mV/V está definida por Schon (1996) como:

$$\mu_{ai} = \frac{1}{V_{DC}[t_{i+1} - t_i]} \int_{t_i}^{t_{i+1}} V_{ip} dt \quad 48$$

Implementando la inversión en 1D como lo plantean Auken et al. (2005) se pueden obtener los 4 parámetros Cole Cole.

Para el dominio del tiempo Pelton et al. (1978) plantearon la expresión que relaciona la cargabilidad intrínseca con los cuatro parámetros Cole Cole como:

$$\mu(t) = \mu_o \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{t}{\tau}\right)^{nc}}{\Gamma(1 + nc)} \quad 49$$

Donde $\tau[s]$, c es adimensionado, $\mu_o [mV/V]$, Γ es la función Gamma.

La μ_o describe la magnitud de la cargabilidad medida en $t=t_o$ y τ el tiempo de relajación. Pelton et al. (1978) plantean que μ y τ dependen en la cantidad de los elementos polarizables y su tamaño respectivamente mientras que c depende en la distribución de los tamaños de los elementos polarizables (Vanhala (1997); Luo y Zhang (1998)).

2.6.3.2 Dominio de la frecuencia

Para realizar la medición de polarización inducida en el dominio de frecuencia, se debe realizar la medición a dos frecuencias diferentes menores a 10 Hz, usando el mismo mecanismo que en dominio del tiempo. A medida que se aumenta el tiempo de inyección de corriente y por lo tanto, se disminuye la frecuencia de medición, se disminuye la resistividad y se disminuye el voltaje residual V_p .

Se puede medir el total de la amplitud del voltaje respecto a la corriente aplicada, pudiéndose obtener la resistencia R y luego la resistividad como la expresión (3). Por lo tanto se puede aplicar la corriente encendiendo y apagando que es lo mismo que aplicar una corriente alterna a una frecuencia dada. Como se mencionó anteriormente, a mayor frecuencia, menor resistividad aparente. Por lo tanto se pueden medir dos resistividades aparentes para obtener el efecto de frecuencia (FE). Esto se puede obtener como:

$$FE = (\rho_{a0} - \rho_{a1})/\rho_{a1} \quad 50$$

Donde ρ_{a0} y ρ_{a1} son las resistividades aparentes en baja y alta frecuencia respectivamente. También se puede expresar como porcentaje.

2.6.4 Cargabilidad Aparente

Seigel (1959) plantea que la cargabilidad definida anteriormente era para un medio homogéneo e isotrópico. Sin embargo, en la práctica, el medio se compone de n materiales diferentes con conductividad σ_i cada uno.

Por lo tanto el voltaje primario en ausencia de la acción dipolar se expresa como $\varphi = \varphi(\sigma_i)$ para dimensiones y posiciones de electrodos definidos. En la presencia de los dipolos $\varphi' = \varphi(\sigma_i')$ donde $\sigma_i' = \sigma_i(1 - \mu_i)$ y donde μ_i son las cargabilidades de los diferentes medios.

Por lo tanto:

$$\varphi' = \varphi(\sigma_i') = \varphi(\sigma_i) + \sum_i (\sigma_i' - \sigma_i) \varphi_i \quad 51$$

Luego,

$$\varphi' = \varphi - \sum_i \sigma_i \mu_i \varphi_i \quad 52$$

Lo que expresa la ecuación anterior es que la presencia de los dipolos es el de aumentar el voltaje primario.

La cargabilidad aparente está definida como:

$$\mu_a = \frac{\varphi' - \varphi}{\varphi'} = -\frac{1}{\varphi'} \sum \sigma_i \mu_i \varphi_i = \sum \mu_i \rho_i d\varphi / d\rho_i \quad 53$$

Donde ρ_i es la resistividad del medio i .

Si se considera la resistividad aparente ρ_a , $\mu \ll 1$ y que $\rho_a' \approx \rho_a$ obtenemos:

$$\mu_a = \sum \mu_i d\log \rho_a / d\log \rho_i \quad 54$$

Si se considera que ρ_a es homogéneo de primer orden en ρ_i obtenemos que:

$$\rho_a = \sum \rho_i d\rho_a / d\rho_i \quad 55$$

O lo que es lo mismo,

$$\sum \frac{d\log \rho_a}{d\log \rho_i} = 1 \quad 56$$

Por lo tanto obtenemos:

$$\mu_a = \frac{\sum \mu_i d\log \rho_a}{\sum d\log \rho_a / d\log \rho_i} \quad 57$$

Asumiendo pequeña interacción dipolar, las fórmulas anteriores aplican a cualquier fase de la curva de decaimiento de voltaje y a cualquier tipo de medición (Seigel (1959)).

En el epígrafe 2.1 se mencionó que la resistividad es la inversa de la conductividad. Sin embargo, Seigel (1959) demostró que se debe incluir la cargabilidad en la relación para los casos en el que el medio es polarizable.

$$\rho = \frac{1}{\sigma(1 - \mu)} \quad 58$$

Para cumplir con la condición de que la resistividad no sea negativa, el valor de μ debe estar entre 0 y 1.

2.6.5 Disposición de electrodos

El dipolo-dipolo es un arreglo muy empleado en IP. Sin embargo, también se han empleado otros arreglos. Leroux (2007) aplicó el arreglo de gradiente con buenos resultados. El arreglo gradiente provee datos con buena resolución lateral y vertical, así como comparaciones numéricas y de campo. Esto ha sido demostrado por Dahlin y Zhou (2004), y por Dahlin y Zhou (2006). Loke (2004) plantea que el arreglo Polo Dipolo es una buena opción para mediciones de IP respecto al arreglo Dipolo Dipolo debido a que presenta mayor fuerza de señal y menor acoplamiento electromagnético.

2.6.6 Proceso de inversión

Oldenburg y Li (1994) linealizaron la ecuación de cargabilidad respecto a la conductividad que contiene los efectos de polarización empleando la expresión de Seigel (1959). Las conductividades se obtienen de la inversión de los datos de la resistividad aparente.

Gazoty et al. (2012) empleó la inversión 1D para obtener los cuatro parámetros Cole Cole, empleando el algoritmo de Gauss Newton con restricciones en la vertical para los parámetros Cole Cole y un factor de amortiguamiento adaptable.

Leroux (2007) empleó el programa RES2DINV (Loke y Barker, 1996). La información IP es invertida junto con la resistividad empleando la misma malla de elementos finitos empleando la siguiente expresión:

$$\rho_i = \rho^{DC}(1 - \mu_i) \quad 59$$

Donde ρ^{DC} es la resistividad del medio no cargado, μ_i es la cargabilidad y ρ_i es la resistividad del medio cargado. Menciona que el programa no toma en cuenta el tiempo en el que la cargabilidad aparente fue medida o el tiempo de integración.

Ward et al. (1995) enfatizan en la necesidad de modelos más rápidos para el proceso de inversión para 3D. Kemna et al. (2012) encuentran que el principal desafío es el de emplear la herramienta como un método cuantitativo para caracterización de estructuras y procesos con gran precisión más que solo velocidad. También plantean la limitante de la suposición de que los parámetros de IP son isotrópicos. Esto se ha demostrado que no es así y la necesidad de darle mucha importancia a la correcta descripción de los errores de datos y grado de ajuste.

En el proceso de inversión de los datos Pelton et al. (1978) plantean que es posible extraer automáticamente los efectos del acoplamiento inductivo del espectro IP. Muchas veces el acoplamiento electromagnético inductivo genera que no se puedan diferenciar materiales como por ejemplo minerales. Para evitar el efecto de acoplamiento inductivo, los cables de corriente deben ser cortos y aislados de los cables de los electrodos de potencial. (Binley y Kemna, 2005),

2.7 Método de ajuste por Mínimos Cuadrados

A pesar que el método de mínimos cuadrados fue descubierto hace unos 200 años sigue siendo la técnica de estadística no trivial más utilizada en la estadística moderna (Stigler, 1986).

Para la mayoría de los experimentos cuantitativos, el método de mínimos cuadrados es la mejor técnica analítica para extraer información de un conjunto de datos. El método es mejor en el sentido de que los parámetros determinados por mínimos cuadrados tienen distribución normal sobre los parámetros verdaderos con las menores desviaciones estándar. Esto se basa en la suposición de que las incertidumbres o errores no están correlacionados y tienen distribución normal (Wolberg, 2006).

El método de mínimos cuadrados lo implementaron Deguerce et al. (2016) y Sainato et al. (2011) y les permitió obtener una buena correlación entre los parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y geoelectrónicos a nivel de suelo edáfico.

Fattorelli, S y Fernandez, P.C (2007) plantean que para poder aplicar el método de mínimos cuadrados se debe cumplir:

- Los errores entre lo observado y lo calculado deben ser distribuidos en forma relativamente simétrica
- Los errores son mutuamente independientes de la línea de regresión
- La varianza a lo largo de la línea es constante

Regresión lineal se denomina cuando la curva ajustada a los datos es una línea recta. Si se asume una correlación lineal entre la variable dependiente Y y la variable independiente X, la relación se puede expresar como 60.

$$Y = m * X + n + \varepsilon_i \quad 60$$

Donde ε_i es el error y es una variable aleatoria con una media de 0

La correlación también se puede establecer entre múltiples variables independientes y una variable dependiente. La ecuación 60 se puede establecer de manera general de la forma 61:

$$Y = f(X) = \sum_{k=1}^{k=p} a_k g_k (X) \quad 61$$

Donde los a_k son los coeficientes o p parámetros de la función de la variable independiente

La solución de mínimos cuadrados radica en minimizar la función objetivo. La función objetivo se puede expresar como la ecuación 62:

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} w_i R_i^2 = \sum_{i=1}^{i=n} w_i (Y_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^{i=n} w_i (Y_i - f(X_i))^2 \quad 62$$

Donde n es el número de datos, Y_i es el i valor medido de la variable dependiente y y_i es el i valor calculado de la variable dependiente. R es el residual y representa la diferencia entre el valor medido y calculado para la posición i. La variable w_i representa el "peso" asociado al valor i.

A pesar que las incertidumbres de la variable X no sean despreciables, se puede asumir que la ecuación 62 sigue siendo válida (Wolberg, 1967).

Para minimizar la función objetivo, se debe derivar la ecuación 62 respecto a las variables a_k e igualar a cero. Es decir:

$$\sum_{i=1}^{i=n} w_i f(X_i) \frac{\partial f(X_i)}{\partial a_k} = \sum_{i=1}^{i=n} w_i Y_i \frac{\partial f(X_i)}{\partial a_k} \quad k = 1 \text{ a } p \quad 63$$

Como matriz, se puede expresar como:

$$CA = V \quad 64$$

Donde C es una matriz de $p \times p$ y A y V son vectores de largo p. Los términos C_{jk} y V_k se pueden expresar como 65 y 66 respectivamente:

$$C_{jk} = \sum_{i=1}^n w_i g_j g_k \quad 65$$

$$V_k = \sum_{i=1}^n w_i Y_i g_k \quad 66$$

Por lo tanto los parámetros a_k se pueden calcular resolviendo la matriz 67.

$$A = C^{-1}V \quad 67$$

La solución de mínimos cuadrados debe cumplir (Helsel y Hirsch 2002):

- La media de los residuales es igual a 0.
- La media de las predicciones \hat{Y}_i debe ser igual a la media de los valores observados y_i .
- La línea de regresión obtenida para por el centroide de los valores experimentales (\bar{y}, \bar{x}) .
- La desviación estándar de los valores obtenidos \hat{Y}_i debe ser menor a la desviación estándar de los valores observados y_i .

El peso asociado a un dato representa la incertidumbre relativa asociada a los diferentes puntos. Se asignarán mayores pesos a los datos que tendrán menor incertidumbre y viceversa. En cierto sentido, los pesos están asociados a las desviaciones estándar (σ_i). Cuando la desviación estándar de los datos es similar, se puede asumir w_i igual a 1 pero cuando esto no ocurre, el ajuste considerando pesos iguales a 1, dará malos resultados. En la Figura 13 se muestra un ajuste entre una serie de datos (X_i, Y_i) empleando $w_i=1$ (OLS, por sus siglas en inglés) y mediante pesos diferentes a 1 (WLS, por sus siglas en inglés).

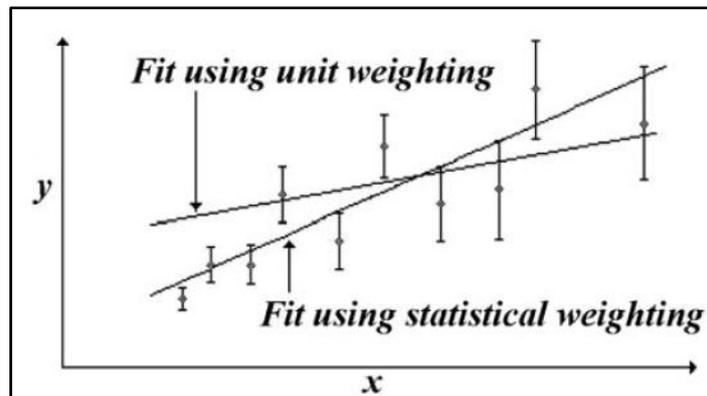


Figura 13: Ajuste por mínimos cuadrados empleando un ajuste con $w=1$ y w calculados mediante estadística. Fuente Wolberg (2006).

Si se asume que los errores o incertidumbres de la variable X son despreciables, se puede asumir que los errores relativos estarán distribuidos aleatoriamente entorno al 0, donde se define error relativo como:

$$Rel\ error_i = \frac{R_i}{\sigma_{y_i}} \quad 68$$

Para que lo anterior se cumpla, el peso se define como $w_i = 1/\sigma_{y_i}$.

Sánchez Miró J. y Pena Gutiérrez J. (1991), establecen que se pueden considerar tres alternativas para el cálculo del peso w_i . En este sentido se puede considerar que todos los pesos son iguales a 1. Esto es correcto cuando la desviación estándar de los datos son similares como se comentó anteriormente o la varianza de los errores es constante (no heterocedasticidad). También se puede considerar los pesos como la desviación estándar de los datos en función del experimento realizado o se pueden obtener en función de los residuales.

Para el cálculo de los pesos cuando no se cuenta con información de la desviación estándar de los datos, Helsel y Hirsch (2002), plantean el método de la función de pesos bicuadrada de Monteller y Tukey (1977). Esta metodología se calcula como 69.

$$w_i = \begin{cases} (1 - u_i^2)^2 & \text{para } |u_i| \leq 1 \\ 0 & \text{para } |u_i| > 1 \end{cases} \quad 69$$

Donde $u_i = \frac{y_i - Y_i}{c * S}$, c toma el valor de 3 y S es el rango intercuartil de los residuales y se calcula como el percentil 75 menos el percentil 25.

2.7.1 Datos Anómalos

Incluir datos anómalos en los análisis de correlación entre dos variables puede llevar a resultados incorrectos y establecer una relación que no es la que la muestra está indicando (Fattorelli, S y Fernandez, P.C, 2007). Fox, J (2015) define un outlier de una regresión como una observación con un valor de respuesta inusual en función de las variables explicativas. Por este motivo, Fox J. (2015) plantea la posibilidad de graficar los residuales estudentizados para detectar outliers de manera gráfica y emplear el test de Bonferroni para su análisis. El test de Bonferroni se basa en el estadístico T de Student y evalúa los p valores de los mayores residuales estudentizados. Para este estudio se debe definir un nivel de significancia α y los grados de libertad definidos como $n-p-2$ donde p es el número de variables de ajuste. En particular el test de Bonferroni se basa en definir la hipótesis nula H_0 : la observación NO es un outlier frente a la hipótesis H_1 : la observación si es un outlier.

También se evaluó la incidencia de los valores medidos en el ajuste realizado a través de la distancia de Cook (Cook, R. D (1977) y su modificación (Belsley et al., 1980). La distancia de Cook se puede obtener mediante la fórmula

$$D_i = \frac{e_{(i)}^2 h_i}{ps^2}, \text{ si } D_i \geq \frac{4}{n-p-2} \text{ se considera un punto influyente} \quad 70$$

Donde $e_{(i)}$ son los residuales obtenidos del ajuste habiendo sacado el i-ésimo valor.

2.7.2 Evaluación del modelo obtenido

Para evaluar el grado de correlación entre dos variables generalmente se pueden emplear los coeficientes de correlación de Kendall (τ), Spearman (ρ) o el de correlación lineal de Pearson (r). El de Kendall y de Spearman tienen la particularidad de medir relaciones lineales y no lineales y son robustos frente a datos anómalos. El coeficiente de Spearman no es recomendado para muestras de menos de 20 datos (Helsel y Hirsch 2002). El coeficiente de correlación de Pearson evalúa la relación lineal entre dos variables. Este coeficiente se puede determinar como 71.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{N * \sigma_x * \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i * y_i - n * \bar{x} * \bar{y}}{N * \sigma_x * \sigma_y} \quad 71$$

Donde n es el número de pares de observaciones (x_i, y_i) y $\bar{x}, \bar{y}, \sigma_x, \sigma_y$ son los promedios y desviaciones estándar de las muestras respectivamente. El valor de r^2 denominado coeficiente de determinación indica la diferencia entre la varianza de los valores observados y la varianza de los valores estimados por la línea de regresión. A mayor valor de r^2 , menor es la diferencia e indica qué porcentaje de la varianza está explicado por la regresión. Al coeficiente de correlación de Pearson se le aplica el test de Student con $n-2$ grados de libertad para evaluar cuando r difiere de 0. La expresión empleada es:

$$tr = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{n-r^2}} \quad 72$$

El inconveniente que plantea el coeficiente de Pearson es que se asume que la información sigue una distribución normal y por lo tanto no es un buen coeficiente si la varianza no es constante.

A partir de haber realizado el ajuste por mínimos cuadrados, se debe determinar si el ajuste realizado es correcto. Para esto, Hersel y Hirsch (2002), plantean la importancia de la visualización de los residuales para detectar anomalías en los datos como pueden ser outliers, curvatura y por sobre todo asegurar que la varianza sea constante o no heterocedasticidad. Para esto también se puede evaluar mediante boxplot de los residuales o histograma. También plantean que uno de los test más importantes a evaluar es el que rechaza que m o la pendiente de la recta es igual a 0.

3 Metodología

En este capítulo se desarrollarán todas las metodologías que se implementaron en el trabajo realizado.

3.1 Selección Sitios de Estudio

Para la selección de los sitios se consideraron escenarios edafo-geológicos diferentes dentro de las zonas de Uruguay que presenta mayor densidad de establecimientos lecheros. Sin embargo, también se consideran los aspectos constructivos de las lagunas de efluentes de los establecimientos lecheros. Un aspecto que se debió tener en cuenta al seleccionar los sitios, fue la posibilidad de acceso a los sitios ya que son de propiedad privada.

Debido al volumen de trabajo a realizar en cada sitio, se optó por seleccionar dos sitios para el desarrollo del trabajo.

3.2 Prospección geofísica

En este estudio se combinaron dos técnicas geofísicas como lo es la ERT2D e IP2D debido a su correcta aplicabilidad al estudio de casos de contaminación en el medio subterráneo como se mencionó en la sección 1. Debido a que el foco del caso de estudio son las lagunas de efluentes en los establecimientos lecheros, las técnicas geofísicas se realizaron en el entorno de estas unidades de gestión de efluente. Estos estudios se realizaron en los taludes y en la zona baja de cada laguna en dirección del gradiente hidráulico con el objetivo de detectar la pluma contaminante en el medio subterráneo si existiese. También se realizaron estudios geofísicos en una zona alejada de la influencia de las lagunas o sitios de contaminación para tener un fondo natural con el cual comparar. Se realizaron conjuntamente perfiles de ERT2D e IP2D.

Las mediciones de ERT2D e IP2D se realizaron con equipamiento modelo *GD-10 Supreme + RES/IP Imaging System* marca *Geomatic* para tomografías de hasta 48 electrodos con espaciamiento máximo de 10 m entre electrodos totalizando una longitud de arreglo total de 470 m. El software de inversión de datos con licencia es *RES2DINV* de *Geotomo*.

Debido a que no se contaba con electrodos no polarizables, una de las tareas realizadas en el marco de este trabajo fue la de construir estos electrodos y su diseño se muestra en la Figura 14. Las dimensiones son de 3 cm de diámetro exterior por 30 cm de alto. La capsula porosa es de cerámica y tiene 3 cm de alto. El electrodo conductor es de cobre de 1.25 cm de diámetro. Para el levantamiento de datos se empleó una solución de sulfato de cobre con agua destilada para mejorar el contacto agua suelo.

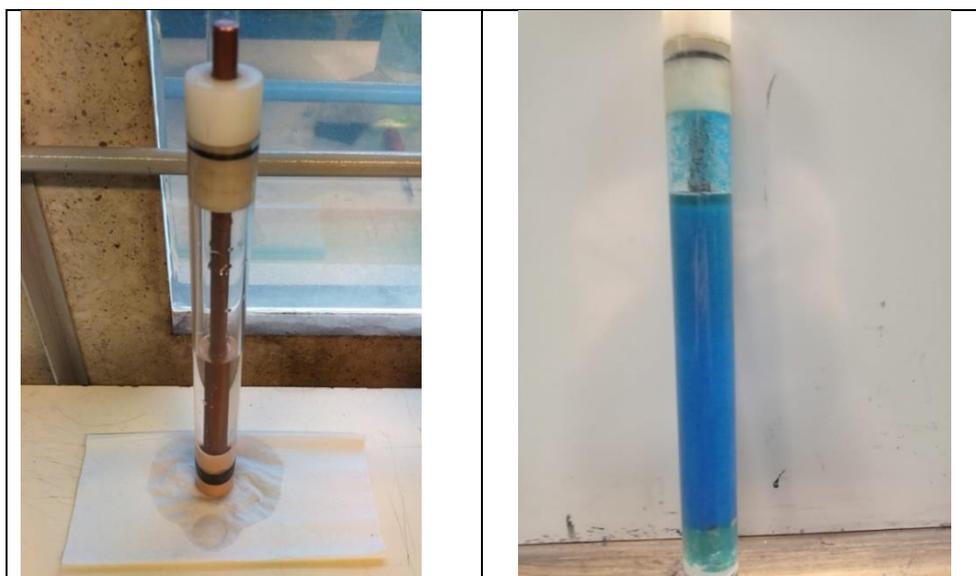


Figura 14: Electrodo no polarizables para IP (izq.), electrodo con solución de sulfato de cobre (der.)

Debido a la profundidad de investigación y el detalle que se requiere en el estudio se realizaron transectos con separación entre electrodos de 1m, 1.5m y 2m y un total de 48 electrodos por transecto para el Sitio 1 y de 60 electrodos para algunas transectos del Sitio 2.

La disposición de electrodos que se empleó para las ERT2D fueron el Wenner Alpha, Beta, Schlumberger y Wenner Schlumberger.

Para la IP2D, se empleó el arreglo Dipolo-Dipolo por lo que se obtiene un perfil de resistividad y uno de cargabilidad, ya que la inversión se realiza de manera conjunta. El tiempo de ciclo de medición de cada punto fue de 2s. Previo a cada medición se realizó una medición con un ciclo de 1s para “cargar” el suelo.

3.2.1 Sitio 1

Los perfiles que se realizaron en cada laguna del Sitio 1 se muestran de la Figura 15 a la Figura 19.

En la Laguna con Arcilla (LA) y Laguna con Geomembrana (LG) se realizaron mediciones en los 4 taludes y en los laterales hacia la zona topográficamente más deprimida. Esto por considerar que es la zona hacia donde se podría extender la pluma de contaminación en el caso de que existiese. En el Sitio Blanco se realizó un solo transecto.

En LA se realizaron 6 transectos de ERT2D e IP2D como se muestra en la Figura 15. Dado que en cada transecto de ERT2D se practicaron los arreglos Wenner Alpha, Wenner Beta, Schlumberger y Wenner Schlumberger, se obtuvieron 24 perfiles de resistividad. Para el levantamiento de datos de IP2D se empleó el arreglo Dipolo Dipolo, por lo tanto, se obtuvieron 6 perfiles de cargabilidad y resistividad con este arreglo. Para el caso de LG, se realizaron 7 transectos (Figura 17) por lo que se obtuvieron 35 perfiles de resistividad (habiendo considerado los de Dipolo Dipolo) y 7 perfiles de cargabilidad. En el Sitio Blanco se realizó un único transecto (Figura 19), por lo que se obtuvieron 5 perfiles de resistividad y uno de cargabilidad.



Figura 15: Transectos de ERT2D e IP2D en LA. Coordenadas en UTM 21S (m).



Figura 16: Electrodo de ERT2D e IP2D en LA. Coordenadas en UTM 21S (m).



Figura 17: Transectos de ERT2D e IP2D en LG. Coordenadas en UTM 21S (m).



Figura 18: Electrodo de ERT2D e IP2D en LG. Coordenadas en UTM 21S (m).



Figura 19: Transecto y Electrodo de ERT2D e IP2D en Sitio Blanco en INIA La Estanzuela. Coordenadas en UTM 21S (m).

3.2.2 Sitio 2

Los perfiles que se realizaron en cada laguna del Sitio 2 y Sitio Blanco se muestran en la Figura 20 a Figura 22.

En las lagunas se realizaron cuatro transectos, dos en sentido norte sur y dos en sentido este oeste. Las dos tomografías que se realizaron en sentido NS se realizaron con separación de electrodos cada 1.5 m y las de sentido EW se realizaron con una separación cada 2 m para alcanzar el nivel freático. Para cubrir una mayor longitud de medición, se realizó un “roll-along” de hasta 60 electrodos desfasando 12 electrodos por única vez para la misma medición.

La tomografía en el Sitio Blanco también se realizó con separación entre electrodos de 1.5 m y 36 electrodos en total.



Figura 20: Transectos de ERT2D e IP2D en lagunas en Sitio 2. Coordenadas en UTM 21S (m).



Figura 21: Electrodo de ERT2D e IP2D en lagunas en Sitio 2. Coordenadas en UTM 21S (m).



Figura 22: Transecto y Electrodo de ERT2D e IP2D en Sitio Blanco en Sitio 2. Coordenadas en UTM 21S (m).

3.2.3 Procesamiento e Inversión del levantamiento de datos

Para la inversión de los datos se incorporó la información topográfica de los electrodos a partir del levantamiento de datos con GPS diferencial. Esto se consideró necesario incluir, debido a la heterogeneidad topográfica en los taludes de las lagunas. La metodología para incorporar la topografía en la inversión de los datos fue el método Schwartz-Cristoffel ya que es la metodología más apta y produce resultados más naturales respecto a las otras metodologías (Loke, 2004).

Los datos considerados para la inversión de IP son los de la ventana 1 para ambos sitios. En el Sitio 1 se configuraron dos ventanas de 40 ms y 80 ms respectivamente y en el Sitio 2 se configuraron 5 ventanas de 40 ms cada una, realizando una medición igualmente espaciada en el tiempo. El equipo con el que se cuenta exporta los datos de cargabilidad en ms por lo que se debió modificar la unidad de los datos a mV/V. El cambio de unidad se realizó dividiendo entre la duración de la ventana de medición según establece la ecuación 45.

Para todas las mediciones geofísicas se realizó un análisis exploratorio de los datos eliminando los datos anómalos o comúnmente denominados “spikes”. Posterior a esto, se realizó un doble

filtrado de los datos brutos, con el objetivo de suavizarlos. El doble filtrado consiste en un filtrado de retroalimentación. Es decir, a los datos obtenidos al aplicar el filtro, se le aplica nuevamente el mismo filtro. La secuencia de eliminar datos anómalos y luego la aplicación de doble filtrado, se optó por realizar en este orden para evitar que los datos anómalos afectaran el filtrado y los datos que se encuentran en el entorno.

El filtro aplicado por nivel para los datos tanto de resistividad como de cargabilidad dentro de un nivel de datos es la ecuación 73 que realiza un filtro con tres puntos para el punto ubicado en la posición i . Para el primer valor de un nivel de datos según la ecuación 74 y para el último valor de un nivel de datos según la ecuación 75.

$$\mu(i) = \frac{\mu(i-1) + \mu(i) + \mu(i+1)}{3} \quad 73$$

$$i = 2, 3, 4, 5, 6 \dots, n-4, n-3, n-2$$

$$\mu(1) = \frac{\mu(1) + \mu(2) + \mu(3)}{3} - 0.5 * (\mu(3) - \mu(1)) \quad 74$$

$$\mu(i) = \frac{\mu(i-2) + \mu(i-1) + \mu(i)}{3} + 0.5 * (\mu(i) - \mu(i-2)) \quad 75$$

$$i = 1, 2, 3, 4, \dots, n-2, n-1, n$$

$n = \text{Número de datos en un nivel}$

La inversión de los datos de resistividad se realizó mediante la herramienta “smooth” incluida en el software RES2DINV ya que se considera la herramienta más apta para plumas de contaminación dado que suaviza los datos en el proceso de inversión (Loke, 2004).

Para los datos de cargabilidad se empleó una inversión en conjunto con la resistividad y se seleccionó un método de transformación “Square root” para asegurar que los valores sean positivos.

Para la visualización de los perfiles invertidos se incluyó la topografía y se estableció una misma escala de colores para representar la resistividad y cargabilidad para cada uno de los sitios de forma que los perfiles obtenidos sean comparables.

3.3 Muestreo de parámetros físicoquímicos de suelo agua y efluente

En función de los datos geofísicos obtenidos y posterior interpretación, en cada zona de incidencia de las lagunas y Sitio Blanco, se realizó un pozo de muestreo para la toma de muestras de suelo para su análisis de laboratorio. Debido a que se busca establecer una correlación entre la anomalía geofísica detectada en el medio subterráneo y la infiltración desde la laguna de efluente, también se tomaron muestras del efluente existente en las lagunas y del agua subterránea extraída de la perforación de abastecimiento.

3.3.1 Recolección, conservación y transporte de muestras

La campaña de muestreo se realizó entre los días 24 y 25 de octubre del año 2020 para el Sitio 1 y entre los días 27 y 28 de abril del año 2021 para el Sitio 2. Las muestras de efluente y agua subterránea se extrajeron el segundo día para disminuir los tiempos entre la colecta de las muestras y su análisis.

El muestreo de suelo se realizó con una perforadora Big Beaver-Torre con comando hidráulico, sistema de perforación helicoidal y adaptaciones para muestreo con taladro (Figura 23). Para las muestras de suelo se extrajeron muestras cada 0.5 m para el primer metro y luego cada 1 metro para analizar las diferentes características del subsuelo.



Figura 23: Perforadora Big Beaver-torre con comando hidráulico

Para el muestreo del efluente se siguieron las recomendaciones de Taverna et al. (2014) y para el muestreo del agua subterránea se consideró la guía de buenas prácticas para la recolección de muestras de agua subterránea publicada por la DINAMA.

La recolección y conservación de las muestras se realizó teniendo en cuenta las especificaciones de muestreo y conservación dispuestas por los laboratorios analíticos intervinientes. Todas las muestras se derivaron a los laboratorios antes de las 48 hs del momento de muestreo.

3.3.2 Análisis de laboratorios y técnicas analíticas

Para cada muestra de suelo se realizó una caracterización granulométrica según ASTM por parte del grupo de investigación en los laboratorios del Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR)). Para la caracterización de las muestras se determinó humedad (%) en base seca, límites plásticos y líquidos, índice de plasticidad y granulometría de finos.

Para el análisis de los parámetros fisicoquímicos, se enviaron las muestras al Laboratorio Agroindustrial (LAAI) respetando los protocolos de toma y conservación de las muestras. Los parámetros fisicoquímicos analizados por el laboratorio se muestran en la Tabla 3 y las técnicas analíticas empleadas se muestran en el Anexo 7.3.

Para el análisis del efluente de las lagunas se enviaron las muestras al LAAI para el Sitio 1 y a Ecotech para el Sitio 2, donde se analizaron los parámetros que se muestran en la Tabla 3 y las técnicas analíticas empleadas se muestran en el Anexo 7.4.

Para el análisis del agua subterránea se enviaron las muestras al laboratorio de Aguas y Suelos del Departamento de Agua de la UdelaR (CENUR LN), que se muestran en la Tabla 3 y las técnicas analíticas empleadas se muestran en el Anexo 7.5.

Tabla 3: Parámetros físico químicos realizados en agua, suelo y efluente en cada sitio.

Parámetro	agua	suelo	efluente
Nitratos (mg/l N-NO_3^-)	x	x	x
Amonio (NH_4^+)			x
Nitrógeno Total Kjeldahl (N)			x
Calcio (Ca^{2+})	x	x	x
Bicarbonatos (HCO_3^+)	x		
Fosfatos (PO_4^{3-})	x	x	x
Magnesio (Mg^{2+})	x	x	x
Potasio (K^+)	x	x	x

Sodio (Na ⁺)	x		x
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	x		x
Cloruros (Cl ⁻)	x	x	x
Fluoruro (F ⁻)	x		
Bromuro (Br ⁻)	x		
Carbono Orgánico Total (COT)		x	x
Conductividad Eléctrica (CE)	x	x	x
pH	x	x	x
Humedad (%)		x	
Alcalinidad (mg/l)	x		x
Dureza total (mg/l)	x		
Carbonato (mg/l)	x		

3.3.3 Calidad de los análisis

El agua subterránea es eléctricamente neutra, por lo tanto, la suma de los cationes expresados en meq/l debe ser igual a la suma de los aniones expresados como meq/l. Por este motivo se estimó el porcentaje de error en el balance de carga iónica para la muestra de agua subterránea, en función de la ecuación 76.

$$error(\%) = \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} * 100$$

76

3.3.4 Sitio 1

En la Figura 24 se muestran los sitios donde se colectaron las muestras en el Sitio 1 y en la Tabla 4 se muestra la ubicación del sitio de muestreo respecto a los electrodos del levantamiento geofísico. Los puntos de muestreo para este sitio, se definieron fundamentalmente en función de la existencia del efluente en superficie en zonas aledañas en ambas lagunas producto del vertido por la tubería de aliviadero y de las anomalías geofísicas detectadas en el levantamiento como se detalla en el capítulo 4.2.1. Las perforaciones realizadas en ambas lagunas alcanzaron una profundidad de 4 m en ambos casos y en el Sitio Blanco solo se logró alcanzar 1.5 m debido a que la geología del sitio no permitía mayor avance con las herramientas disponibles.

Para este caso, se considera que los errores experimentales se encuentran en la colecta de datos de los datos geofísicos y no así en los datos fisicoquímicos. Por este motivo se aplican los pesos W_i a los valores obtenidos de resistividad y cargabilidad obteniendo una correlación WLS. Como no se cuenta con la desviación estándar de los datos geofísicos, se implementó el cálculo mediante la metodología de Monteller y Tukey (1977) explicada en el capítulo 2.7.1. A partir de los resultados obtenidos, se calcularon nuevamente los coeficientes de ajuste y el análisis de los residuales, el cual es el que se presenta.

4 Resultados

4.1 Descripción de los sitios de estudio

En ambos establecimientos lecheros seleccionados se tiene en un mismo sitio una laguna impermeabilizada con membrana geotextil de 1 mm de espesor y otra mediante sistemas convencionales de impermeabilización con arcilla compactada. Esta variante en los sitios permite comparar metodologías constructivas bajo condiciones edafo-geológicas muy similares. La ubicación de los dos sitios se muestra en la Figura 26. Las características de ambos sitios seleccionados se detallan en la sección 4.1.1 y 4.1.2 respectivamente.

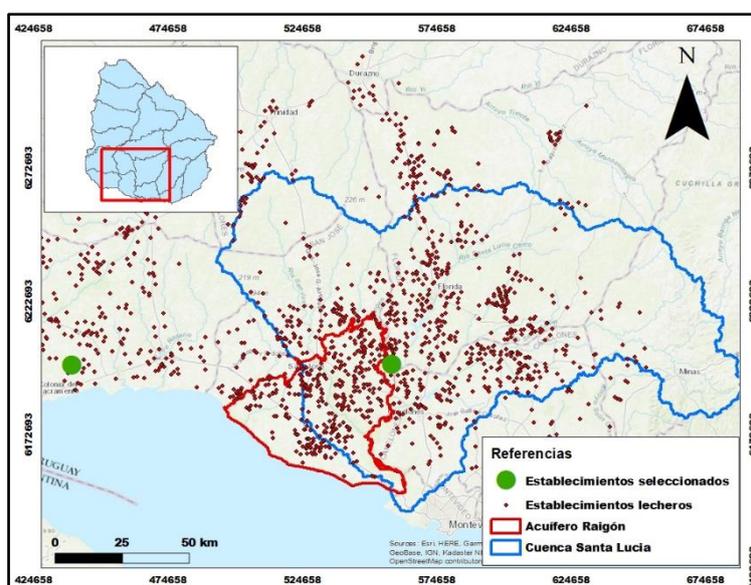


Figura 26: Establecimientos lecheros seleccionados para realizar los estudios. Coordenadas en UTM 21S (m).

4.1.1 Sitio 1-INIA La Estanzuela

Este sitio perteneciente al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Presenta dos lagunas de almacenamiento de efluentes debido a que tiene dos establecimientos lechero en el sitio. Una de ellas presenta arcilla compactada como mecanismo de impermeabilización y la otra presenta impermeabilización con membrana geotextil de espesor de 1 mm. De aquí en adelante solo se indicarán como LA y LG respectivamente.

En la Figura 27 se muestran las dos lagunas de almacenamiento de efluente existente en el sitio y el Sitio Blanco seleccionado para realizar las mediciones.



Figura 27: Lagunas de almacenamiento de efluente y Sitio Blanco en INIA La Estanzuela. Coordenadas en UTM 21S (m).

El mapa de suelos según MGAP escala 1:200.000 se muestra en la Figura 28.

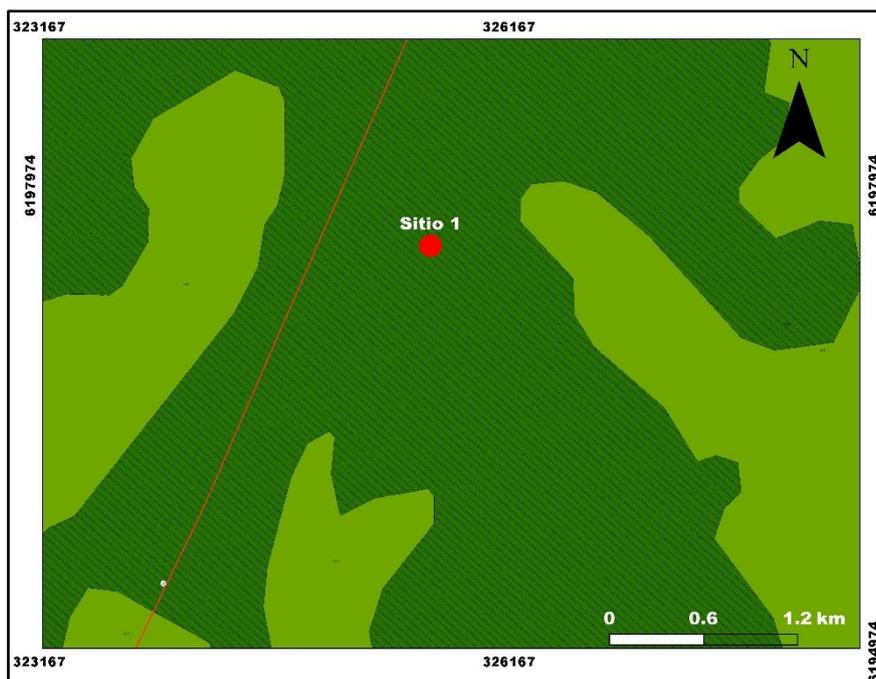


Figura 28: Carta de Suelos Sitio 1. Escala: 1:200.000 (Fuente MGAP). Coordenadas en UTM 21S (m).



SGG4-San Gabriel-Guaycurú 4. Suelos moderadamente profundos; pardos; poco diferenciados y de diferenciación media; texturas medias y algo livianas con pedregosidad. Dominan Brunsoles Eutrícos y Háplicos Limo arcillosos.



EP-LB.2-Ecilda Paullier-Las Brujas 2. Suelos profundos; pardos oscuro a negro; poco a algo diferenciados; texturas pesadas. Dominan Brunsoles Éutrícos Típicos y Brunsoles Subéutrícos Lúvicos (ambos Limo arcillosos). Material generador: Sedimentos limo arcillosos de la Fm. Raigón.

La geología existente en la zona se muestra en la Figura 29.

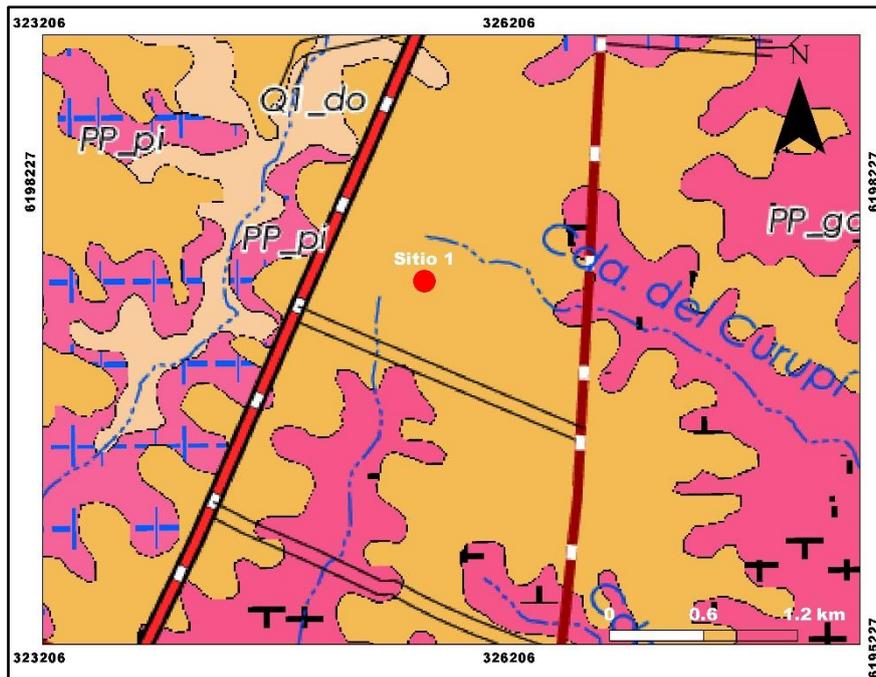


Figura 29: Geología de superficie Sitio 1. Escala 1:100000 (Fuente DINAMIGE. Dirección Nacional de Minería y Geología).
Coordenadas en UTM 21S (m).

- Fm. Dolores (Cenozoico)**: Lodolitas y areniscas arcillosas muy finas, de colores pardos. Sedimentación continental, relacionada a fenómenos eólicos y de coluvación. Spoturno et al. (2004c).
- Fm. Libertad (Cenozoico)**: Lodolitas, loees y fangolitas con porcentaje variable de arenas y arcillas, de color pardo a pardo rojizo. Sedimentación continental perdidesértica. Preciozzi et al. (1985).
- Granito Piedra Los Indios (Paleoproterozoico)**: Granito cuya composición mineral es integrada por feldespato potásico como mineral predominante, luego cuarzo y biotita.
- Granito Aº Minuano (Paleoproterozoico)**: Granito de facies de grano muy grueso con tendencia a porfiroide, con fenocristales de feldespato.

En la Figura 30 se muestra una imagen de LG y en la Figura 31 LA.



Figura 30: LG en INIA.



Figura 31: LA en INIA.

4.1.1.1 Características hidrogeológicas

El establecimiento del INIA se abastece de una serie de perforaciones distribuidas en el predio. En particular los dos establecimientos lechero se abastecen de una perforación que se muestra en la Figura 32.

En la Tabla 6 se resumen las principales características de la perforación que se obtuvieron mediante un ensayo con cámara de video y consulta a la empresa que realizó la perforación.

Tabla 6: Características perforación abastecimiento INIA

Perforación INIA	
Cota topográfica (msnm)	65.7
Profundidad total	37
Profundidad NE (m)	17
Diámetro (m)	0.15
Boca de pozo (m)	0.5
Cota NE (msnm)	48.7

Espesor Sedimentos Fm. Libertad estimados (m)	18
Q (m ³ /h)	3



Figura 32: Perforación de abastecimiento de INIA y sitios de levantamiento geofísico. Coordenadas en UTM 21S (m).

Mediante GPS diferencial se relevaron estructuras que se encuentran en el entorno de ambas lagunas y tienen incidencia en los resultados geofísicos obtenidos. En la Figura 33 y Figura 34 se muestra su ubicación y en la Tabla 7 sus características.



Figura 33: Puntos importantes relevados en LG.



Figura 34: Puntos importantes relevados en LA

Tabla 7: Características puntos importantes relevados en LG y LA

Sitios Relevados		
Identificador	Nombre	Cota (msnm)
1	Tubería entrada LG	71.81
2	Salida sistema aplicación de efluente	71.65
3	Salida tubería aliviadero LG	71.65
4	Descarga tubería aliviadero LG	71.22
5	Salida tubería LA	65.78
6	Salida tubería aliviadero LA	67.77
7	Descarga tubería aliviadero 2 LA	66.11
8	Tubería entrada LA	68.19

4.1.2 Sitio 2

El Sitio 2 es un emprendimiento particular que tiene tres lagunas de almacenamiento de efluentes de establecimientos lechero. Una de las lagunas fue impermeabilizada con membrana geotextil en marzo de 2019. Las restantes dos lagunas permanecen con revestimiento de arcilla compactada (Laguna 1 y Laguna 2). Actualmente el sistema funciona con la Laguna 1 de manera continua y de manera alternada la laguna 2 y 3 en función del nivel de efluente en las mismas. La laguna impermeabilizada (Laguna 3) aún no tiene instalado el sistema de aplicación de efluente a terreno.

En la Figura 35 se muestran las tres lagunas de almacenamiento de efluente existente en el sitio y el Sitio Blanco seleccionado para realizar las mediciones.



Figura 35: Lagunas de almacenamiento de efluente y Sitio Blanco en Sitio 2. Coordenadas en UTM 21S (m).

El mapa de suelos se muestra en la Figura 36 (MGAP escala 1:40.000).

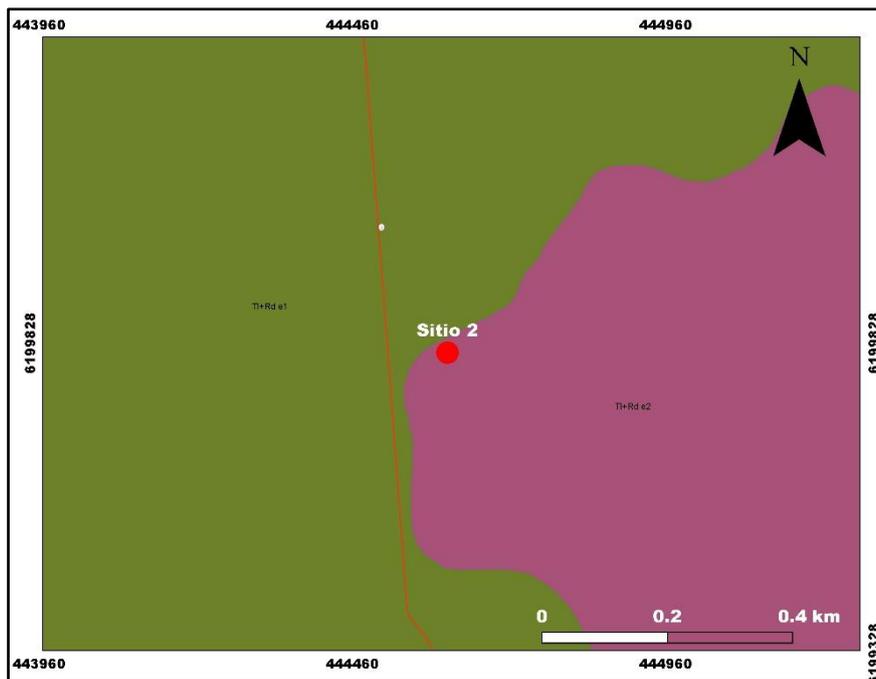


Figura 36: Carta de Suelos Sitio 2. Escala: 1:40.000 (Fuente MGAP). Coordenadas en UTM 21S (m).

Tl+Rd e1

Tala-Rodríguez e1. La serie Tala se clasifica como Vertisol Rúptico Lúvico Limo arcilloso. Rodríguez es Brunosol Éutrico Típico Limo arcillosa. La unidad TL+Rd e2 es un complejo de suelos integrados por la serie Tala (50%) y la serie Rodríguez (35%). Grado de erosión ligero (e1). Material generador: Sedimentos limos arcillosos de la Fm. Libertad.

Tl+Rd e2

Tala Rodriguez e2. La serie Tala se clasifica como Vertisol Rúptico Lúvico Limo arcilloso. Rodriguez es Brunosol Éutrico Tipico Limo arcillosa. La unidad TL+Rd e2 es un complejo de suelos integrados la serie Tala (50%) y la serie Rodriguez (35%). Grado de erosión moderado (e2). Material generador: Sedimentos limos arcillosos de la Fm. Libertad.

La geología existente en la zona del Sitio 2 se muestra en la Figura 37.

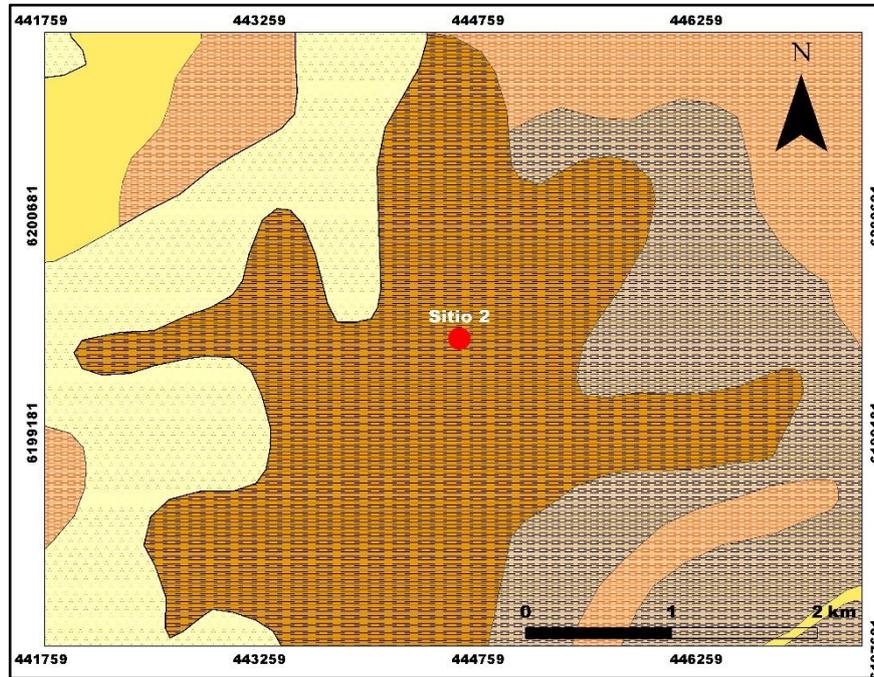
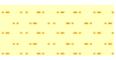
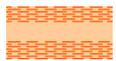


Figura 37: Geología de superficie Sitio 2. Escala 1:500000 (Fuente DINAMIGE). Coordenadas en UTM 21S (m).

-  **Actual:** Sedimentos limo-arcillosos, arenosos a veces conglomerádicos (aluviones y coluviones), depósitos de turbas. Preciozzi et al. (1985)
-  **Fm. Dolores:** Lodolitas y areniscas arcillosas muy finas, de colores pardos. Sedimentación continental, relacionada a fenómenos eólicos y de coluvación. Spoturno et al. (2004c).
-  **Fm. Libertad:** Lodolitas, loess y fangolitas con porcentaje variable de arenas y arcillas, de color pardo a pardo rojizo. Sedimentación continental peridesértica. Preciozzi et al. (1985).
-  **Fm. Raigón:** Areniscas finas a conglomerádicas, mal seleccionadas, con estratificación cruzada y paralela, de color blanco amarillento. Sedimentación fluvial a fluvio deltaica. Preciozzi et al. (1985).
-  **Fm. Fray Bentos:** Areniscas muy finas y loess, con porcentaje variable de arena fina, a veces muy arcillosas, masivas, de color naranja. Sedimentación continental peridesértica. Preciozzi et al. (1985).

En la Figura 38 se muestra la zona de las lagunas y laguna con impermeabilización con membrana geotextil.



Figura 38: Laguna impermeabilizada con membrana geotextil Sitio 2.

4.1.2.1 Características hidrogeológicas

El establecimiento se abastece de una perforación que se encuentra aguas abajo del establecimientos lechero. En el establecimiento también existe una perforación de brocal (ladrillo revestido) pero que actualmente está fuera de funcionamiento. En la Figura 39, se muestra la ubicación de ambas perforaciones.

En la Tabla 8 se resumen las principales características de las perforaciones aunque no se pudo obtener el perfil litológico descrito por la empresa perforista.

Tabla 8: Características perforaciones existentes en el establecimiento.

Perforación Abastecimiento	
Cota topográfica (msnm)	41.3
Profundidad total	42
Profundidad NE (m)	11.5
Diámetro (m)	0.15
Boca de pozo (m)	0.5
Cota NE (msnm)	29.8
Perforación Brocal	
Cota topográfica (msnm)	43.8
Profundidad total	15
Profundidad NE (m)	13
Diámetro (m)	1.5
Altura sobre terreno de boca de pozo (m)	1
Cota NE (msnm)	30.8



Figura 39: Perforaciones existentes en el establecimiento. Coordenadas en UTM 21S (m).

Debido a que no se contaba con información del perfil litológico de la perforación, se visitó una cantera de extracción de material para construcción, que se encuentra a 1.2 km del Sitio 2. También se solicitó la descripción litológica de la perforación que se encuentra en Villa Independencia, Florida perteneciente a OSE y que se encuentra a unos 500 m del Sitio 2. La descripción del perfil encontrado en la cantera y de la perforación de OSE se muestra en el Anexo 7.2 y muestra un estrato superior de unos 5 metros de espesor de la Fm. Dolores. A partir de los 5 metros de profundidad comienza la Fm. Raigón hasta los 38 m de profundidad en función del perfil litológico de la perforación de OSE. Respecto a la cota del nivel estático informado en esta perforación y en la perforación del Sitio 2, hay consistencia entre sí y se puede considerar que el aporte de agua subterránea principal corresponde a la Fm. Raigón en ambos casos.

4.2 Prospección Geofísica

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos del levantamiento realizado en cada sitio. Debido al volumen de información relevado y procesado, en esta sección se presentan los resultados obtenidos de resistividad (ohm.m) mediante el arreglo Schlumberger y de cargabilidad (mV/V) mediante el arreglo Dipolo Dipolo. En el Anexo 7.1 se presentan todos los perfiles obtenidos.

4.2.1 Sitio 1

En el Sitio 1, INIA La Estanzuela, se relevaron los taludes y zonas aledañas de LA y LG como se mostró en la sección 3.2.1. También se realizó un transecto de ERT2D e IP2D en un sitio considerado Sitio Blanco. Todos los resultados aquí presentados son los obtenidos mediante un doble filtrado.

4.2.1.1 Laguna con Arcilla

En la Figura 40 y Figura 41 se muestran los perfiles obtenidos de resistividad con el arreglo Schlumberger en ohm.m y de cargabilidad en mV/V en LA en tres dimensiones.

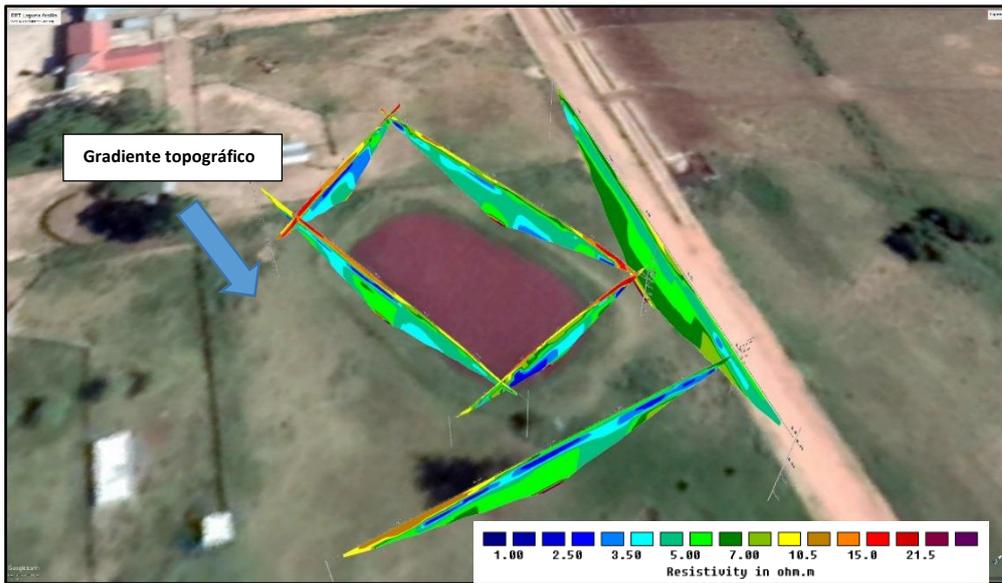


Figura 40: Perfiles de ERT2D en 3D obtenidos con disposición electrónica Schlumberger sobre imagen satelital en LA.

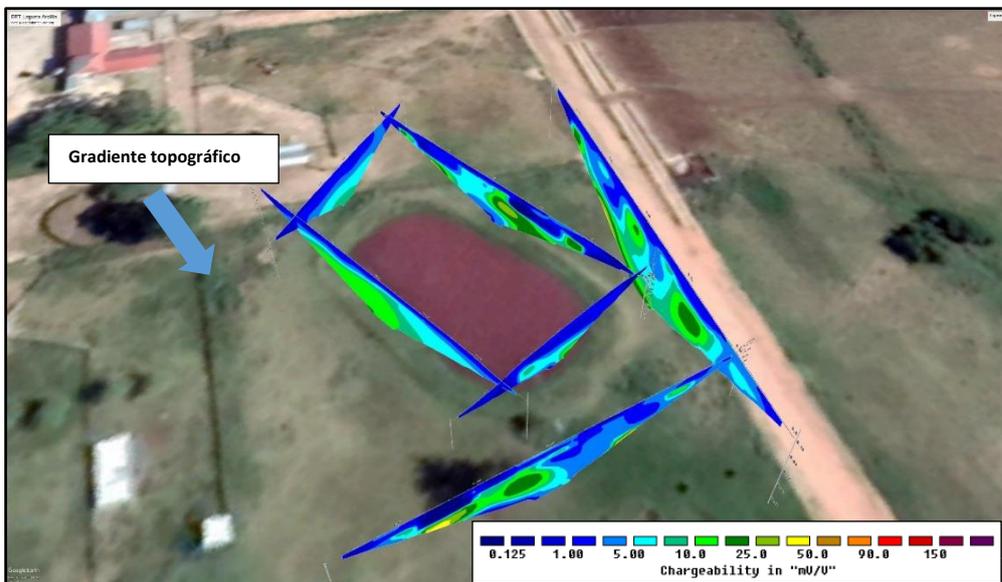


Figura 41: Perfiles de IP2D en 3D obtenidos sobre imagen satelital en LA.

4.2.1.2 Laguna con Geomembrana

En la Figura 42 y Figura 43 se muestran los perfiles obtenidos de resistividad con el arreglo Schlumberger en ohm.m y de cargabilidad en mV/V en LG en tres dimensiones.



Figura 42: Perfiles de ERT2D en 3D obtenidos con disposición electrónica Schlumberger sobre imagen satelital en LG.

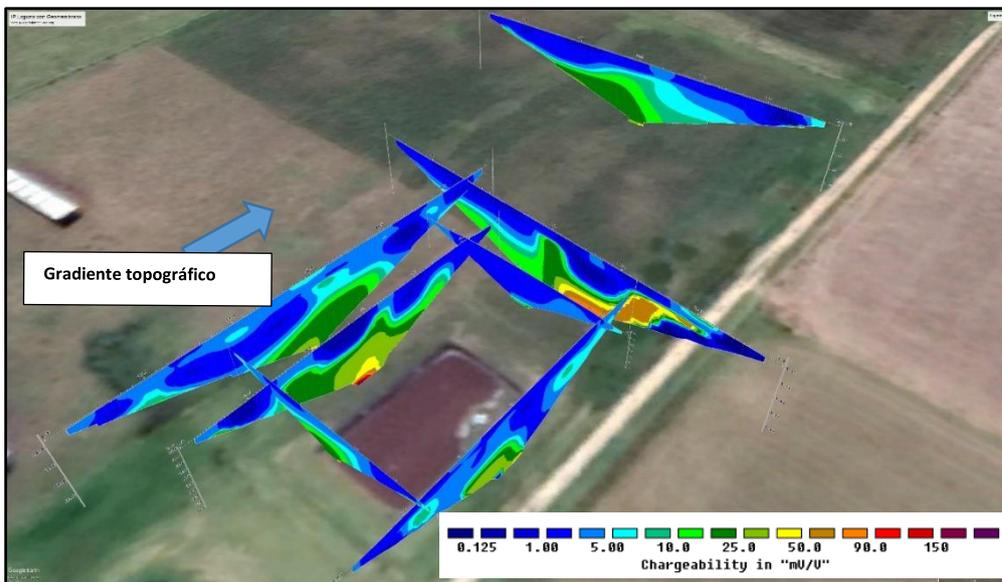


Figura 43: Perfiles de IP2D en 3D obtenidos sobre imagen satelital en LG.

4.2.1.3 Sitio Blanco

En la Figura 44 se muestra el perfil obtenido de resistividad con el arreglo Wenner Alpha en ohm.m en el Sitio Blanco sobre imagen satelital. Para el caso de Sitio Blanco se muestra la disposición electrónica Wenner Alpha debido a que el arreglo Schlumberger muestra estructuras resistivas que no se consideran coherentes a la geología del sitio. En la Figura 45 se muestra el perfil obtenido de cargabilidad en mV/V.

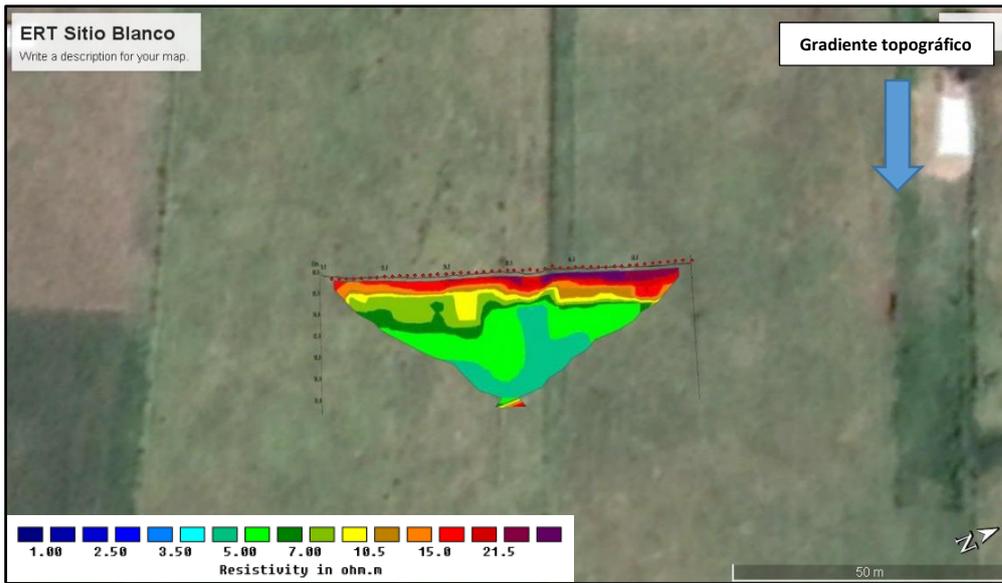


Figura 44: Perfil de ERT2D obtenido con disposición electrónica Wenner Alpha sobre imagen satelital en Sitio Blanco.

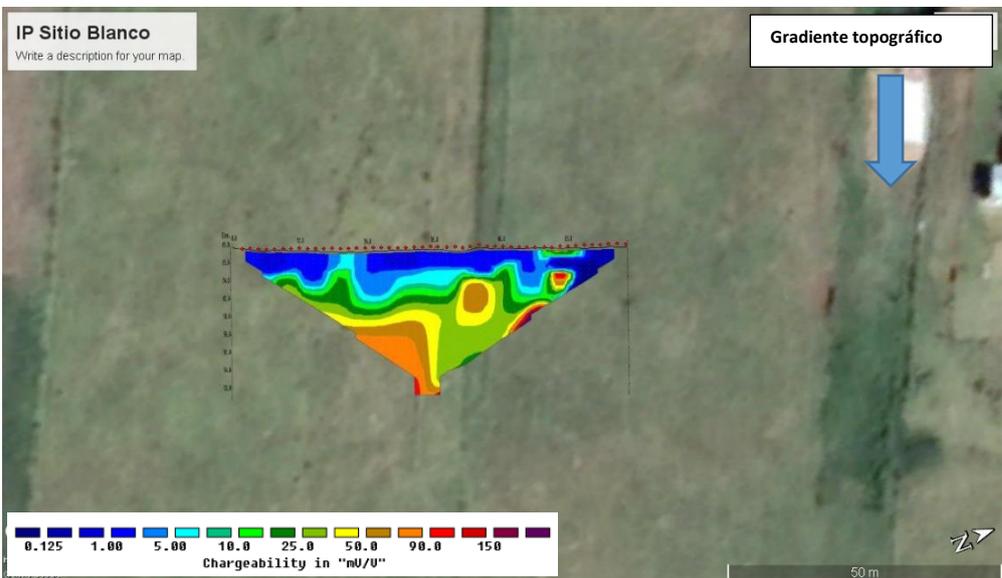


Figura 45: Perfil de IP2D obtenido sobre imagen satelital en Sitio Blanco.

4.2.1.4 Análisis de resultados geofísicos Sitio 1

ERT2D

Todos los perfiles obtenidos independientemente del arreglo eléctrico practicado muestran una alta coherencia entre sí y errores de ajuste menor al 5%. Los puntos eliminados considerados como *spikes* en todos los casos fue menor al 5% del total de datos levantados. Esto con excepción del arreglo Schlumberger y Wenner Schlumberger en Sitio Blanco (ver Anexo 7.1.1.3 Figura A.61 y Figura A.62) que muestra zonas de alta heterogeneidad resistiva en profundidades medias, con zonas alternadas de alta y baja resistividad.

A nivel general, el medio presenta resistividades medias a bajas, con dos estratos claramente diferenciados y tres estratos en algunos sitios. El primer estrato que se podría asociar al suelo edáfico presenta resistividades mayores a 10 ohm.m en la mayoría de los casos. Esta resistividad aumenta en las zonas de mayor compactación arriba de los taludes y en zonas con bajo contenido de humedad en superficie como lo es el transecto 7 de LG y el transecto de Sitio Blanco que es donde se presentan los mayores valores de resistividad para este estrato (mayor a 50 ohm.m). En este primer estrato, se puede destacar una diferencia entre ambas lagunas,

presentando mayores valores de resistividad en términos generales LG. Situación que se puede explicar debido al mayor grado de compactación por encima de los taludes por el trabajo con maquinaria pesada.

Las zonas con menores valores de resistividad en superficie (menor a 7 ohm.m), se detectaron hasta la progresiva 39 m (E27) del transecto 4 (Figura 46) y hasta la progresiva 32 m (E17) del transecto 6 (Figura 47) de LA. En LG, se observa un comportamiento similar entre las progresivas 22 m (E12) y 34 m (E18) del transecto 6 (Figura 48). Estas zonas de anomalía resistiva respecto al medio se indican en las figuras con un contorno punteado de color rojo. Estas zonas de baja resistividad coinciden con zonas donde hay efluente en superficie producto del vertido desde las lagunas a través de las tuberías de aliviadero como se indica en la Figura 33 y Figura 34.

El segundo estrato a partir de los 2.5 m de profundidad presenta menores valores de resistividad en términos generales respecto al primer estrato. En particular, este estrato se puede subdividir en algunos casos en dos estratos. El primero de ellos entre los 2.5 m y 5 m de profundidad con resistividades menores a 5 ohm.m. Este estrato se evidencia en el transecto 6 (Figura 47) y 7 de LG y en todos los transectos de LA, a excepción del transecto 3. En este transecto la zona con menor resistividad se localiza puntualmente en la progresiva 34 m (E35), comenzando a los 2.5 m desde la superficie y se extiende en profundidad. El segundo estrato de esta zona presenta resistividades menores a 8 ohm.m. Este rango de resistividades es coherente respecto a la geología existente en el sitio a esa profundidad y a lo obtenido por Giménez et al. (2018). En particular, entre las progresivas 22 m (E12) y 34 m (E18) del transecto 6 (Figura 47) de LG y hasta la progresiva 39 m (E27) del transecto 4 (Figura 46) de LA, se observa una anomalía resistiva de disminución de la resistividad respecto al medio desde superficie hacia profundidad. Es de destacar que la diferencia de resistividad en términos absolutos es solamente de 2 a 3 ohm.m, ya que el medio presenta bajas resistividades en términos generales como se comentó anteriormente. Esta diferencia solo se evidencia en los arreglos Schlumberger y Wenner Schlumberger. Esto es consistente según lo mencionado en la sección 2.3, respecto a la mayor sensibilidad del arreglo Schlumberger y Wenner Schlumberger para la detección de anomalías horizontales y verticales respecto a los arreglos Wenner.

En el último estrato se puede evidenciar un aumento de resistividades. Este aumento se observa solo en los casos de los transectos que alcanzan mayores profundidades y se encuentran en las zonas topográficamente más deprimidas como lo es el transecto 6 de LA (Ver Anexo 7.1.1.3 Figura A.25). Este aumento de resistividad se puede asociar a la zona de alteración de los granitos existentes en la zona. Según la descripción litológica de la perforación de abastecimiento del INIA que se muestra en el Anexo 7.2, el granito se encuentra aproximadamente a los 19 m de profundidad.

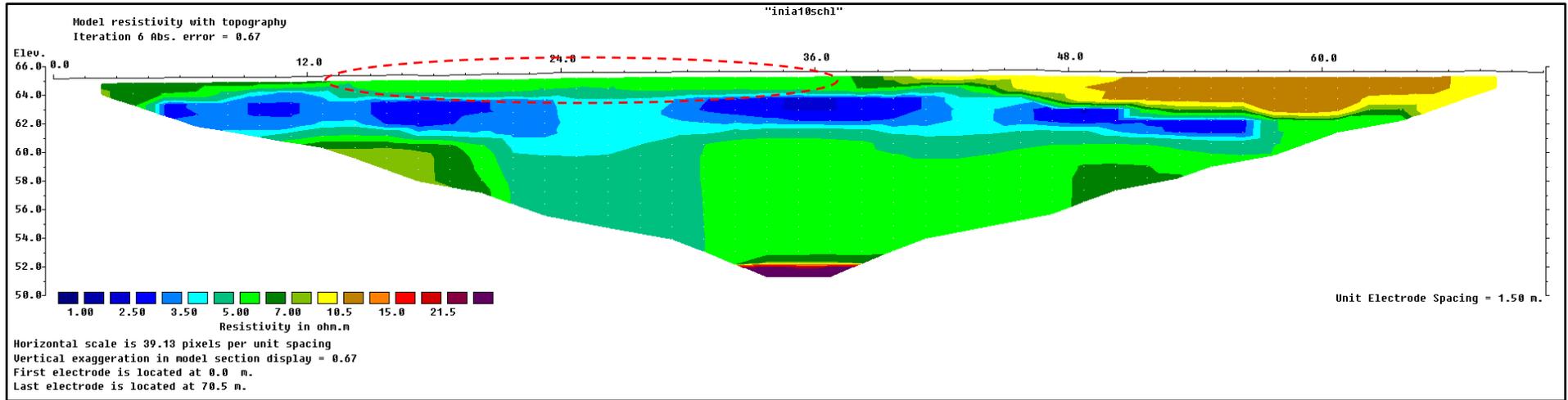


Figura 46: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 4 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger. Punteado rojo indica anomalía geofísica.

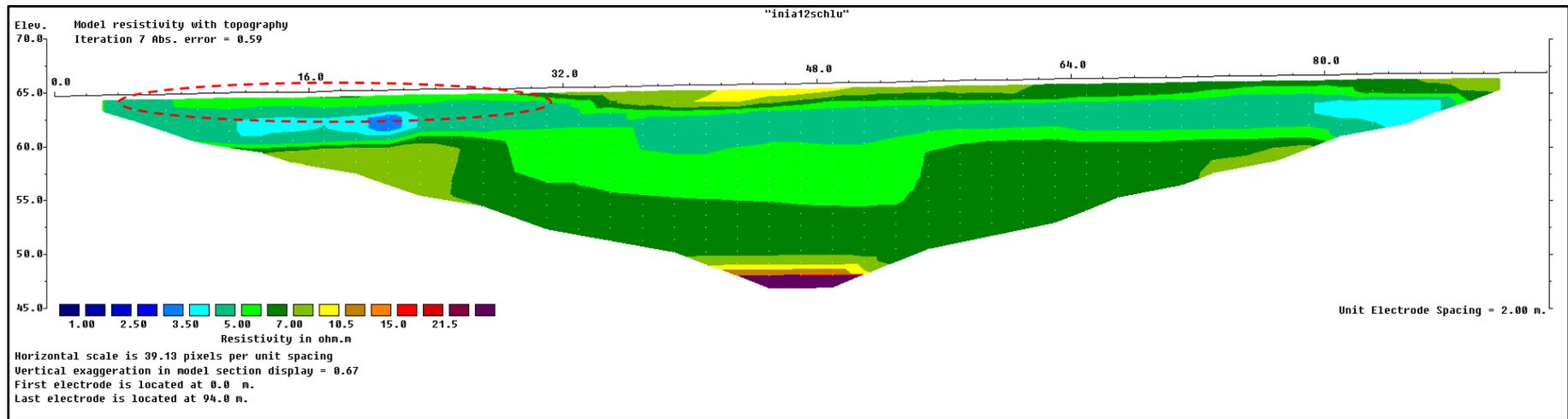


Figura 47: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 6 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger. Punteado rojo indica anomalía geofísica.

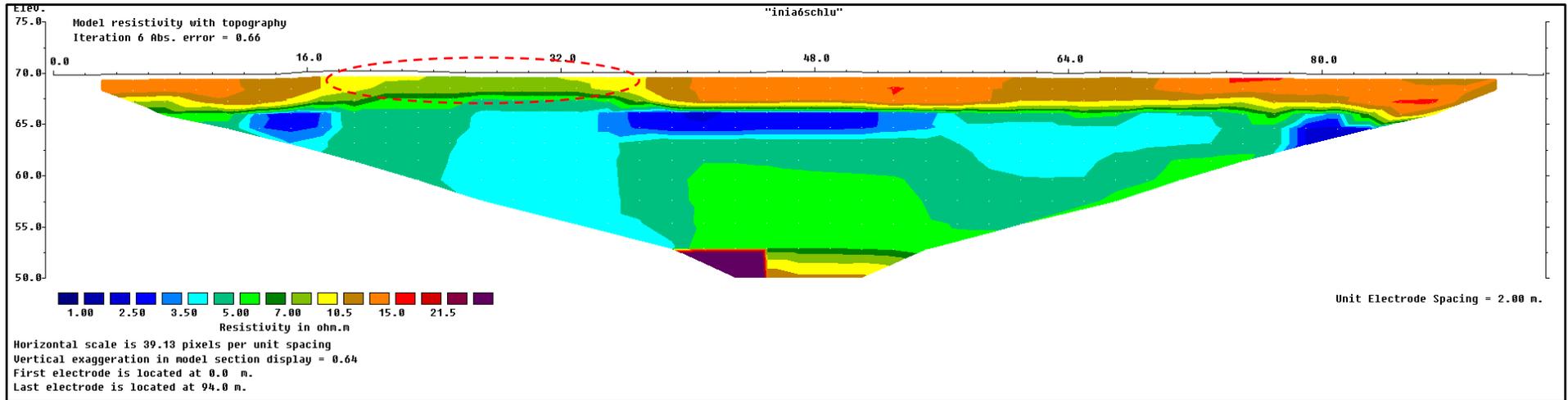


Figura 48: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 6 de LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger. Punteado rojo indica anomalía geofísica.

IP

Todos los perfiles obtenidos muestran errores de ajuste menor al 5%. Los puntos eliminados considerados como *spikes* en todos los casos fue menor al 5% del total de datos levantados.

A nivel general, el medio presenta cargabilidades bajas, con dos estratos claramente diferenciados. El primer estrato se caracteriza por presentar cargabilidades menores a 5 mV/V. A partir de los 5 m de profundidad, la cargabilidad aumenta a nivel general. Los valores aumentan por encima de 25 mV/V. Este aumento se presenta de manera gradual hacia profundidad en algunos casos y en otros se presenta en forma de bloques. Este segundo comportamiento se visualiza con mayor claridad en los transectos 4 (Figura 49), 5 y 6 de LA (Anexo 7.1.1.3 Figura A.21 y Figura A.25 respectivamente). El transecto 6 de LG (Figura 50) y el Sitio Blanco (Figura 51) son los perfiles que presentan los mayores valores de cargabilidad en profundidad, alcanzando valores por encima de los 100 mV/V en algunos sectores. El aumento de cargabilidad hacia las zonas más profundas se puede deber a la respuesta a la zona de alteración de granitos existentes en la zona. Esto no era detectado en la mayoría de los perfiles de ERT2D ya que la profundidad alcanzada era menor. En particular, entre las progresivas 22 m (E12) y 34 m (E18) del transecto 6 de LG (Figura 50) y hasta la progresiva 39 m (E27) del transecto 4 de LA (Figura 49), se observa una cargabilidad menor a 2 mV/V y menor a 4 mV/V respectivamente. Cabe destacar que la zona indicada anteriormente del transecto 4 de LG presenta una heterogeneidad importante en cuanto a los valores de cargabilidad a partir de los 5 metros de profundidad. En esa zona se encuentran dos estructuras de cargabilidad claramente diferenciadas. Hasta la progresiva 32 m, los valores de cargabilidad son mayores a 50 mV/V, mientras que a partir de la progresiva 32 m, la cargabilidad disminuye por debajo de 2 mV/V.

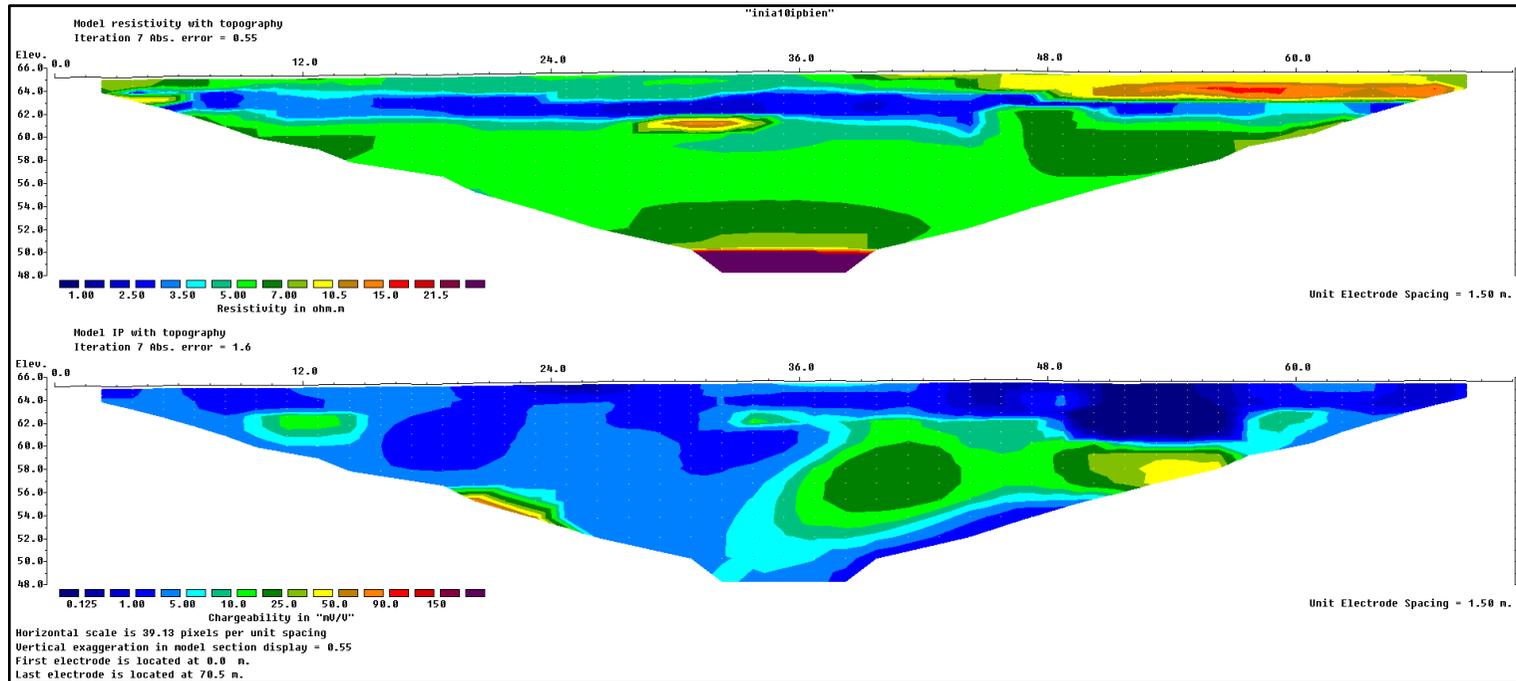


Figura 49: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 4 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

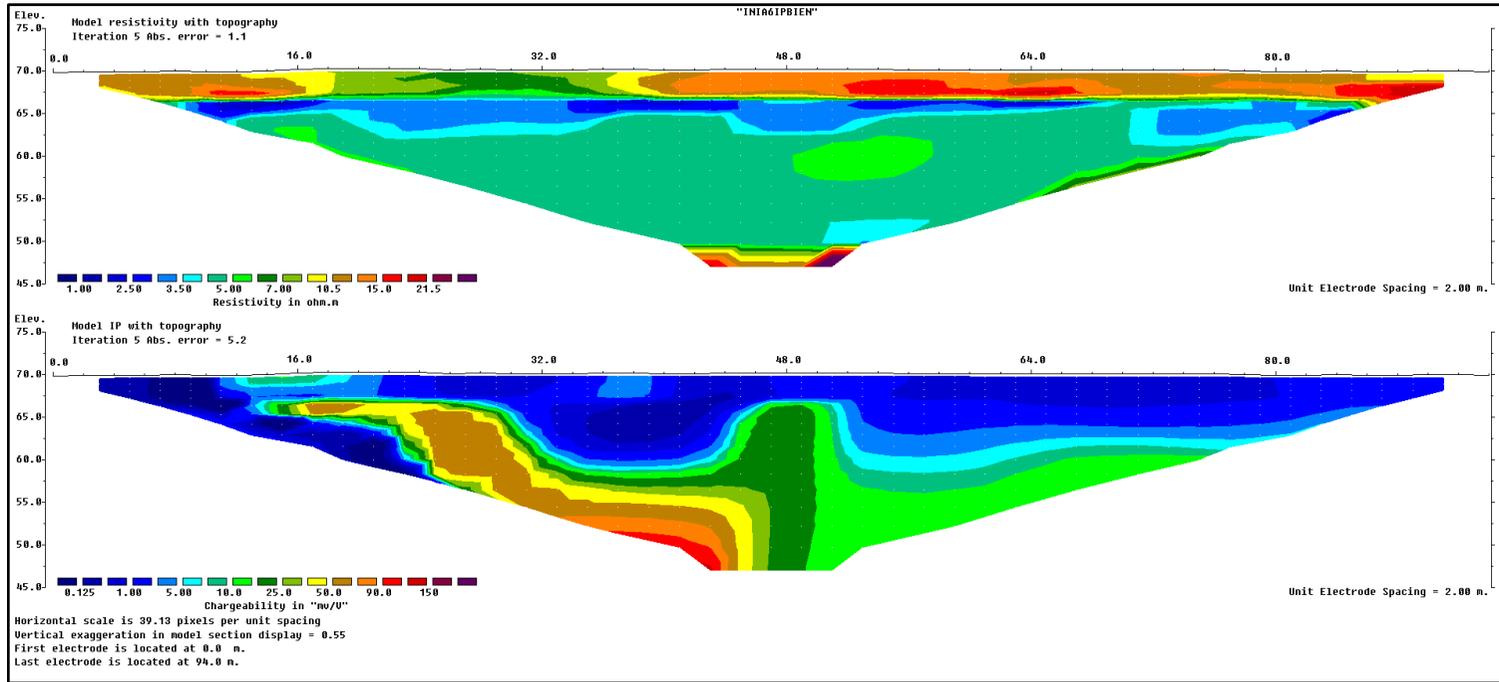


Figura 50: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 6 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

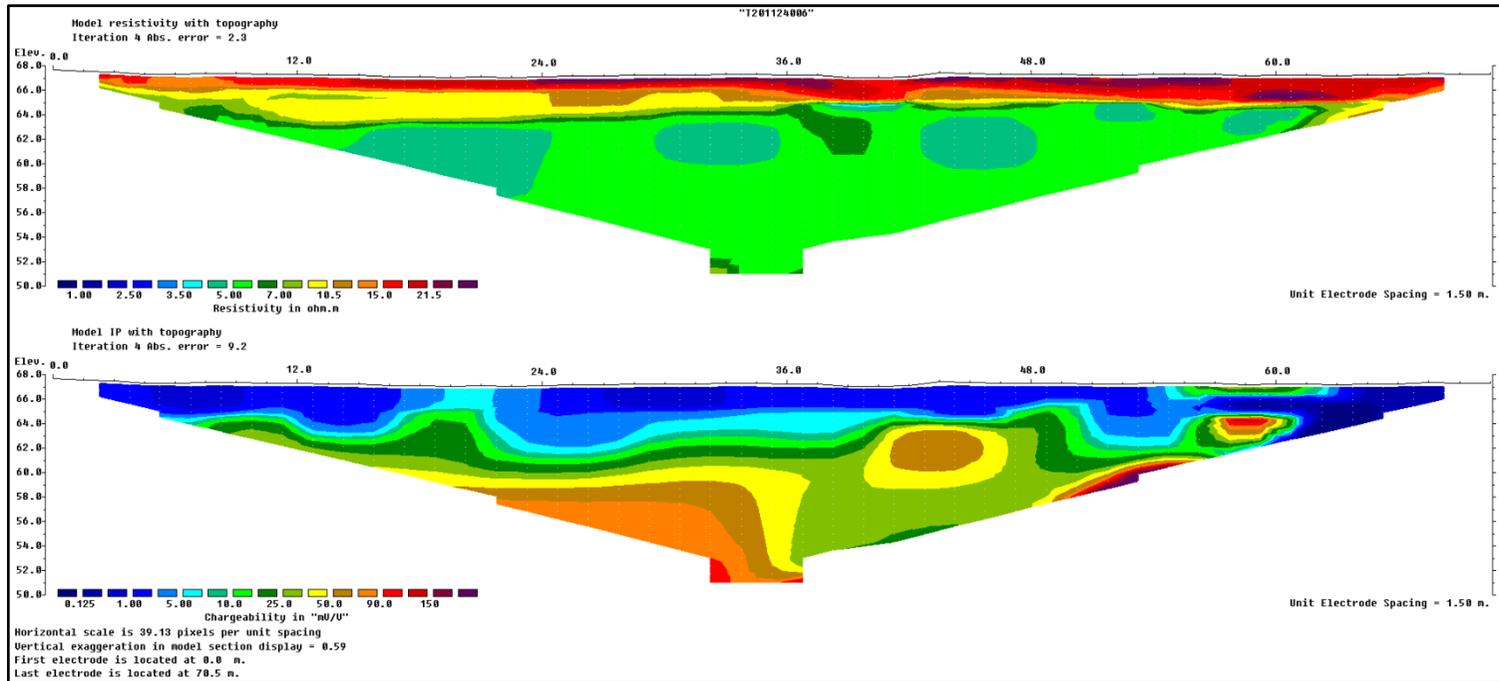


Figura 51: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP Sitio Blanco, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

4.2.2 Sitio 2

En el Sitio 2, se relevaron los taludes y zonas aledañas de las lagunas como se mostró en la sección 3.2.1. También se realizó un transecto de ERT2D e IP2D en un sitio considerado fondo blanco. Todos los resultados aquí presentados son los obtenidos mediante un doble filtrado.

4.2.2.1 Lagunas de almacenamiento de efluente

En la Figura 52 y Figura 53 se muestran los perfiles obtenidos de resistividad con el arreglo Schlumberger en ohm.m y de cargabilidad en mV/V en tres dimensiones.



Figura 52: Perfiles de ERT2D en 3D obtenidos sobre imagen satelital en zona de laguna.

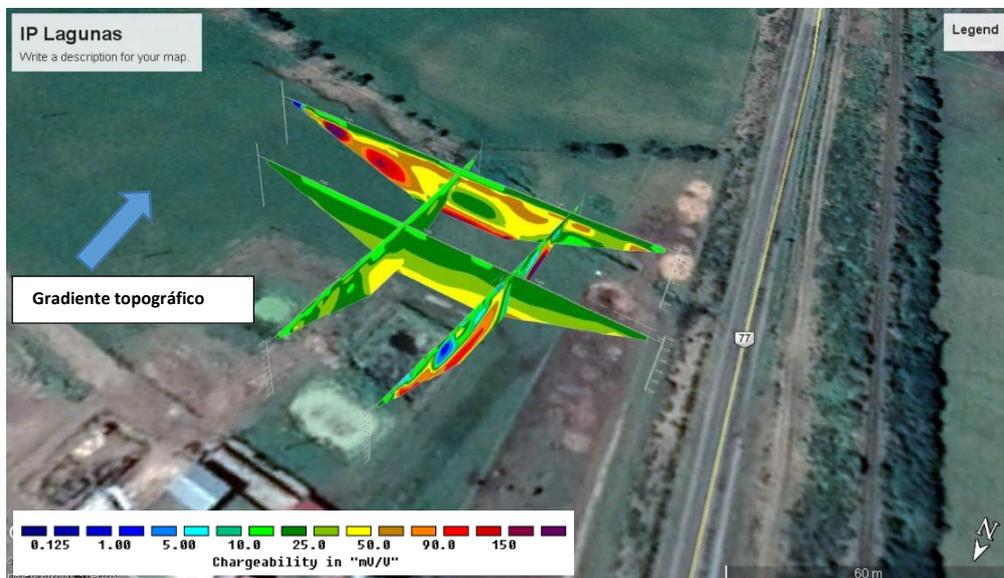


Figura 53: Perfiles de IP2D en 3D obtenidos sobre imagen satelital en zona de lagunas

4.2.2.2 Sitio Blanco

En la Figura 54 se muestra el perfil obtenido de resistividad con el arreglo Schlumberger en ohm.m sobre imagen satelital. En la Figura 55 se muestra el perfil obtenido de cargabilidad en mV/V.

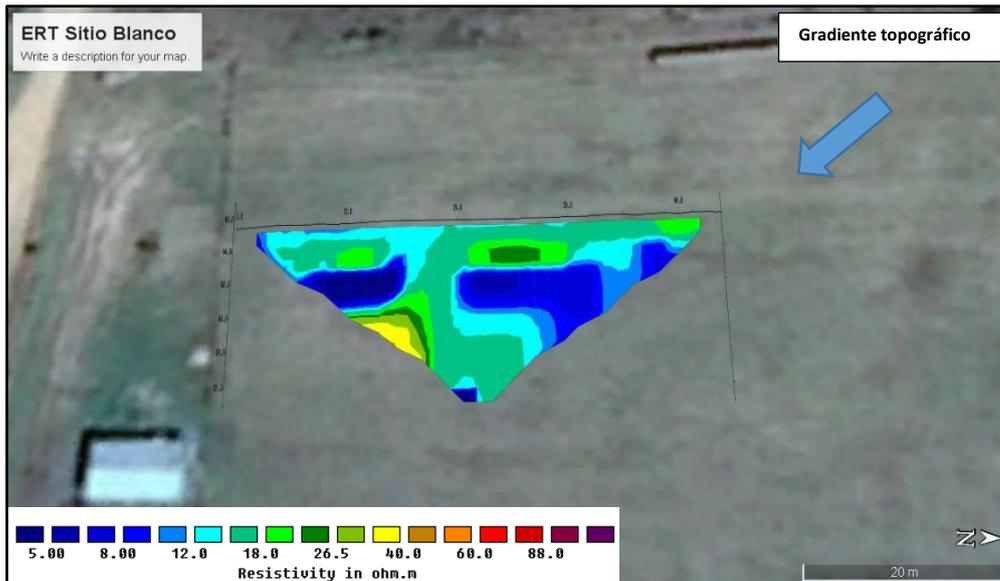


Figura 54: Perfil de ERT2D obtenido con disposición electrónica Schlumberger sobre imagen satelital en Sitio Blanco.

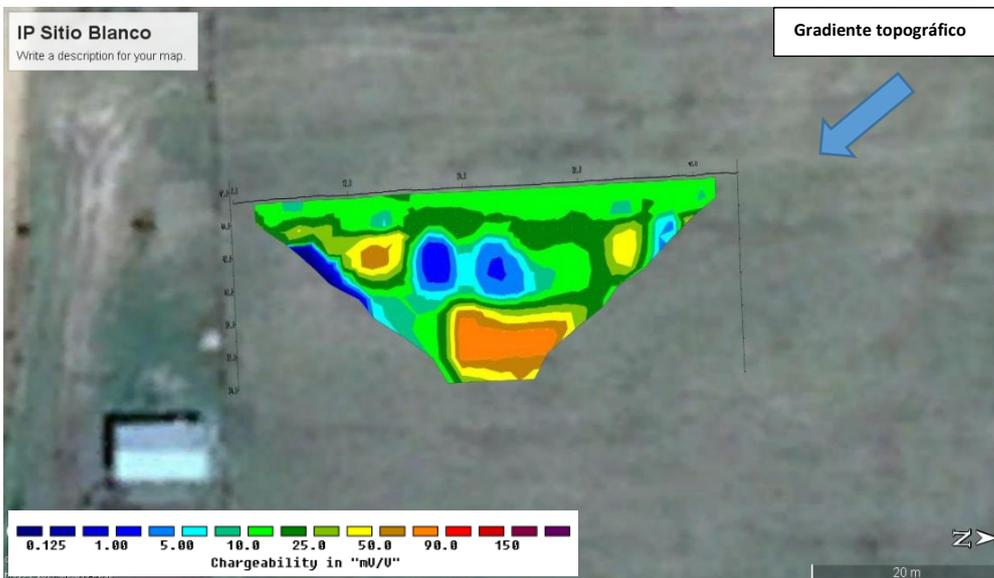


Figura 55: Perfiles de IP2D obtenidos sobre imagen satelital en Sitio Blanco.

4.2.2.3 Análisis de resultados geofísicos Sitio 2

ERT2D

Todos los perfiles obtenidos, independientemente del arreglo electrónico practicado, muestran una alta coherencia entre sí y errores de ajuste menor al 5% a excepción de los perfiles 2 y 4 para el arreglo Dipolo Dipolo que presentaron errores del 9%. Los puntos eliminados considerados como *spikes* en todos los casos fue menor al 5% del total de datos levantados

A nivel general, el medio presenta resistividades medias altas a bajas, con tres estratos claramente diferenciados. El primer estrato se podría asociar al suelo edáfico y a los primeros 3-5 m del subsuelo según el arreglo electrónico considerado. Este estrato presenta una pequeña capa en superficie de aproximadamente 1 m de espesor con resistividades menores a 20 ohm.m. Desde 1 m de profundidad hasta los 5 m de profundidad, la resistividad disminuye a rangos menores a 10 ohm.m para todos los perfiles relevados en términos generales.

El segundo estrato se encuentra a partir de los 5 m de profundidad hasta los 12 m aproximadamente. En este estrato, la resistividad aumenta considerablemente y presenta

resistividades mayores a 40 ohm.m y en algunos sitios mayores a 90 ohm.m. En el caso del Sitio Blanco este estrato no se logra diferenciar del estrato superior para ninguno de los arreglos electródicos practicados y solamente se insinúa en una zona en la progresiva 18 m, aunque las resistividades nunca superan los 50 ohm.m. Esto se debe a que la zona de mayor resistividad en el entorno de las lagunas se insinúa a partir de la cota 36 m y el transecto Sitio Blanco apenas alcanza esta cota debido a la diferencia topográfica entre ambos sitios. Cabe destacar que en este estrato entre las progresivas 30 m (E21) y 42 m (E29) del transecto 1 se evidencia una anomalía resistiva de disminución de la resistividad respecto al medio indicada con línea punteada en color rojo en la Figura 56. Comportamiento similar en términos de la resistividad, se observa entre las progresivas 48 m y 62 m del transecto 3 (Ver Anexo 7.1.2 Figura A.71).

En el último estrato se puede evidenciar una disminución de resistividades por debajo de los 8 ohm.m para los transectos 3 y 4 a partir de aproximadamente los 12 metros de profundidad, cota 30 msnm (ver Anexo 7.1.2 Figura A.71 y Figura A.74 respectivamente). La cota en donde se da la disminución de resistividades, coincide con la cota del nivel estático medido en las perforaciones relevadas en el Sitio 2 (Ver Tabla 8).

Los valores obtenidos de resistividad y espesores para los dos estratos superiores que no se encuentran saturados (0-5m y 5m-11 m aproximadamente) son consistentes con la composición de las formaciones geológicas existentes en la zona, en función de los perfiles litológicos indicados en el Anexo 7.2, que indican unos 5 m de potencia para la Fm. Dolores y a partir de los 5m de profundidad se encuentra la Fm. Raigón.

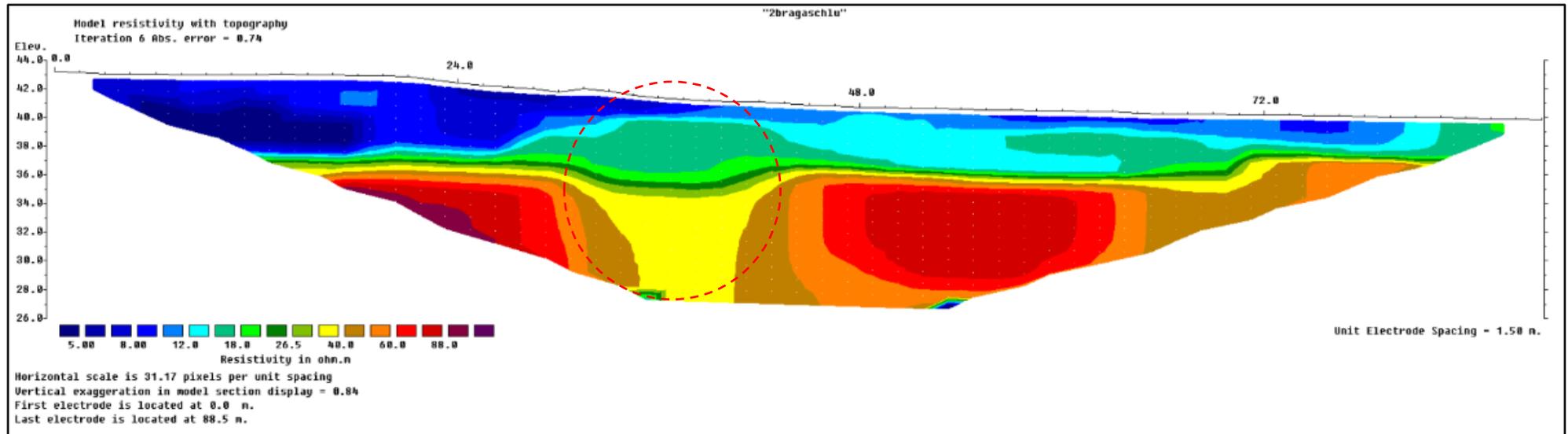


Figura 56: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Schlumberger. Punteado rojo indica anomalía geofísica.

IP

Todos los perfiles obtenidos muestran errores de ajuste menor al 5% a excepción de los perfiles 2 y 4 que presentan errores del 7% respectivamente. Los puntos eliminados considerados como *spikes* en todos los casos fue menor al 10% del total de datos levantados

El medio presenta cargabilidades bajas y medias. A nivel general se puede destacar dos estratos claramente diferenciables. El primer estrato que alcanza los 4 metros de profundidad presenta valores de cargabilidad menores a 10 mV/V. A mayor profundidad, el comportamiento de las cargabilidades presenta mayor heterogeneidad con zonas de baja y alta cargabilidad para un mismo transecto. En este sentido, para el transecto 1 existe una anomalía de cargabilidad respecto al medio que muestra una zona de aumento de cargabilidad (valores cercanos a 50 mV/V) entre las progresivas 36 m (E25) y 42 m (E29) indicado con línea punteada de color rojo en la Figura 57. Esta zona coincide con la anomalía resistiva indicada en la Figura 56 como una disminución de la resistividad respecto al entorno para ese estrato.

Para el transecto 2, el perfil es más heterogéneo a partir de los 4 m de profundidad y presenta mayor error de ajuste respecto al transecto 1. Se podría considerar una zona de alta cargabilidad alternada con una zona de baja cargabilidad entre las progresivas 54 m (E37) y 60 m (E41). Estas zonas de alta cargabilidad superan los 150 mV/V y coinciden con las zonas de alta resistividad (Ver Anexo 7.1.2 Figura A.70).

El transecto 3 presenta mayor homogeneidad en las cargabilidades obtenidas y se observa un gradiente positivo en profundidad. Las cargabilidades van desde 10 mV/V en superficie hasta aproximadamente 50 mV/V en profundidad (Ver Anexo 7.1.2 Figura A.73).

El transecto 4 al igual que el transecto 2, presenta un perfil heterogéneo en cuanto a las cargabilidades obtenidas. En este sentido, a partir de los 4 m de profundidad, se observan zonas de baja y alta cargabilidad (Ver Anexo 7.1.2 Figura A.76)

Por último, para el transecto correspondiente al Sitio Blanco, el perfil de cargabilidades a partir de los 5 metros de profundidad también presenta heterogeneidades en los estratos inferiores con zona de alta y baja cargabilidad pero nunca por encima de 90 mV/V (Anexo 7.1.2 Figura A.79).

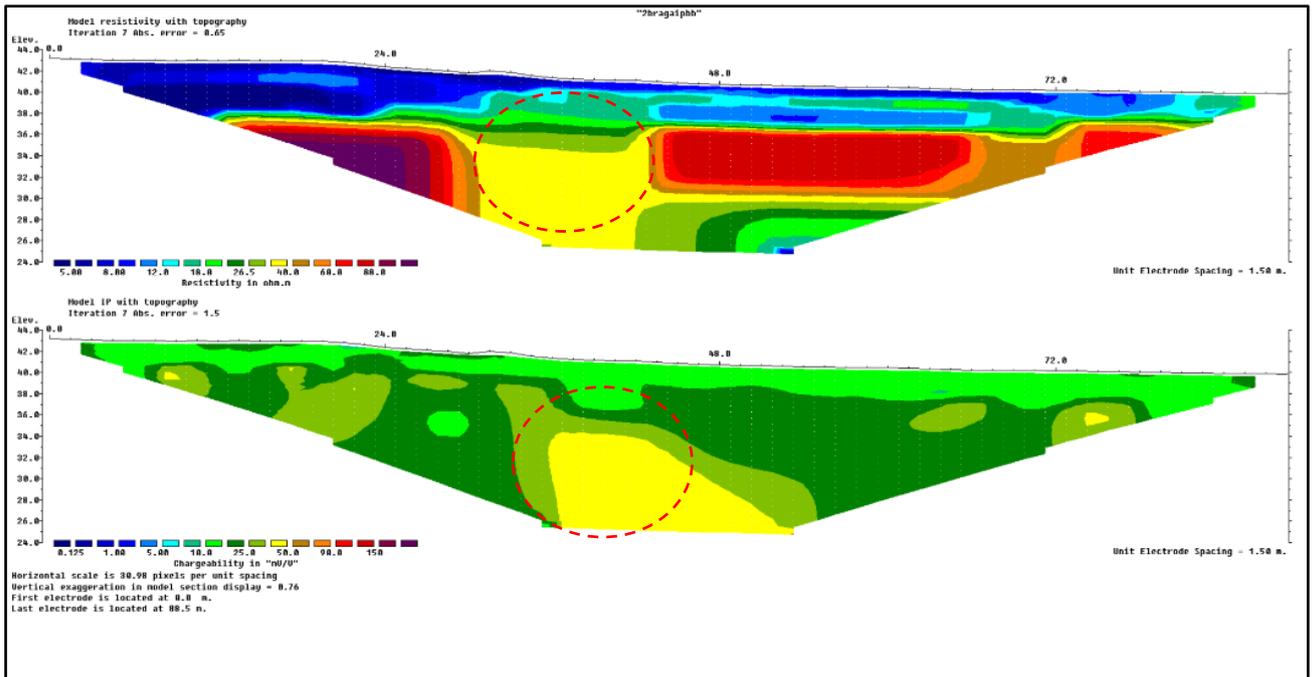


Figura 57: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 1 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo. Punteado rojo indica anomalía geofísica.

4.3 Parámetros Físicoquímicos

4.3.1 Sitio 1

4.3.1.1 Análisis de suelos

Las perforaciones realizadas en el Sitio 1 respecto a los perfiles de resistividad para el arreglo Schlumberger y resistividad y cargabilidad para el arreglo Dipolo Dipolo se muestran de la Figura 58 a Figura 63. La selección de los sitios de muestreo se basó en el criterio de muestrear donde había efluente en superficie y se observaron anomalías geofísicas.

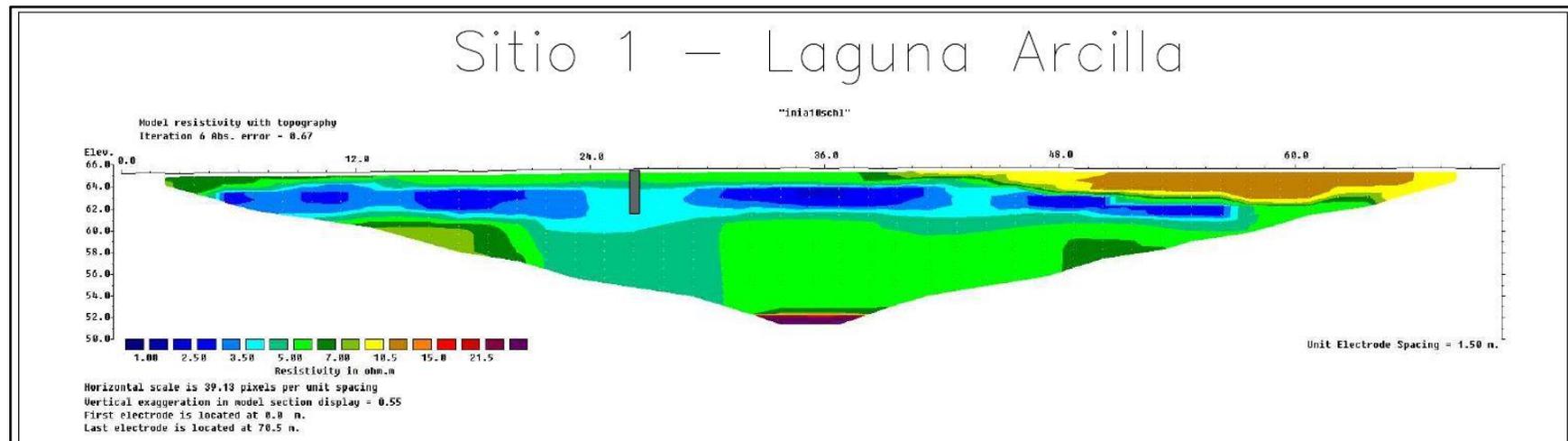


Figura 58: Perfil de ERT Schlumberger con perforación realizada en LA-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada

Sitio 1 – Laguna Arcilla

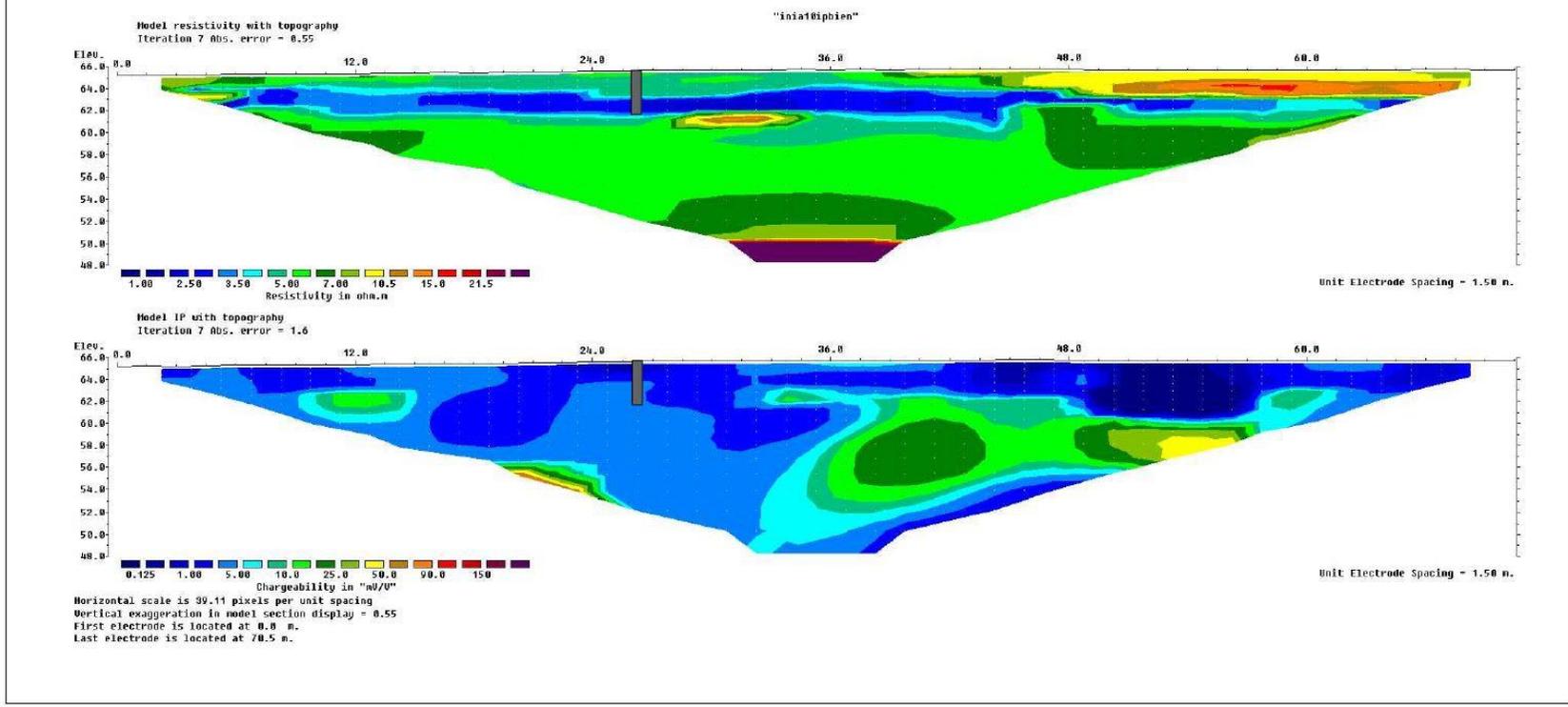


Figura 59: Perfiles de IP y ERT Dipolo Dipolo con perforación realizada en LA-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada

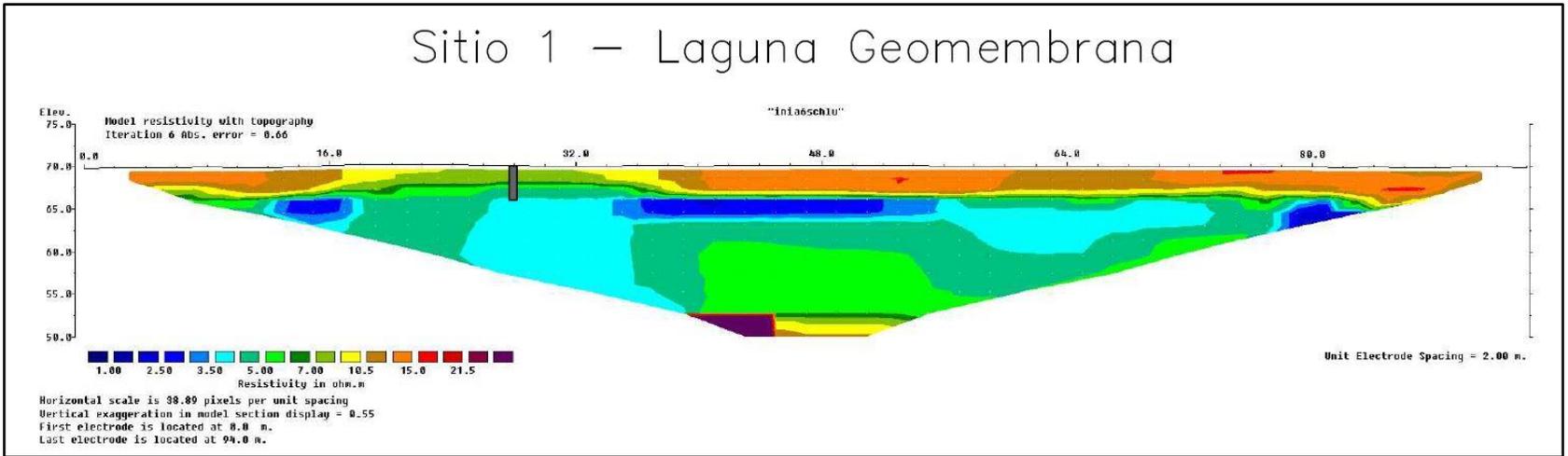


Figura 60: Perfil de ERT Schlumberger con perforación realizada en LG-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada

Sitio 1 – Laguna Geomembrana

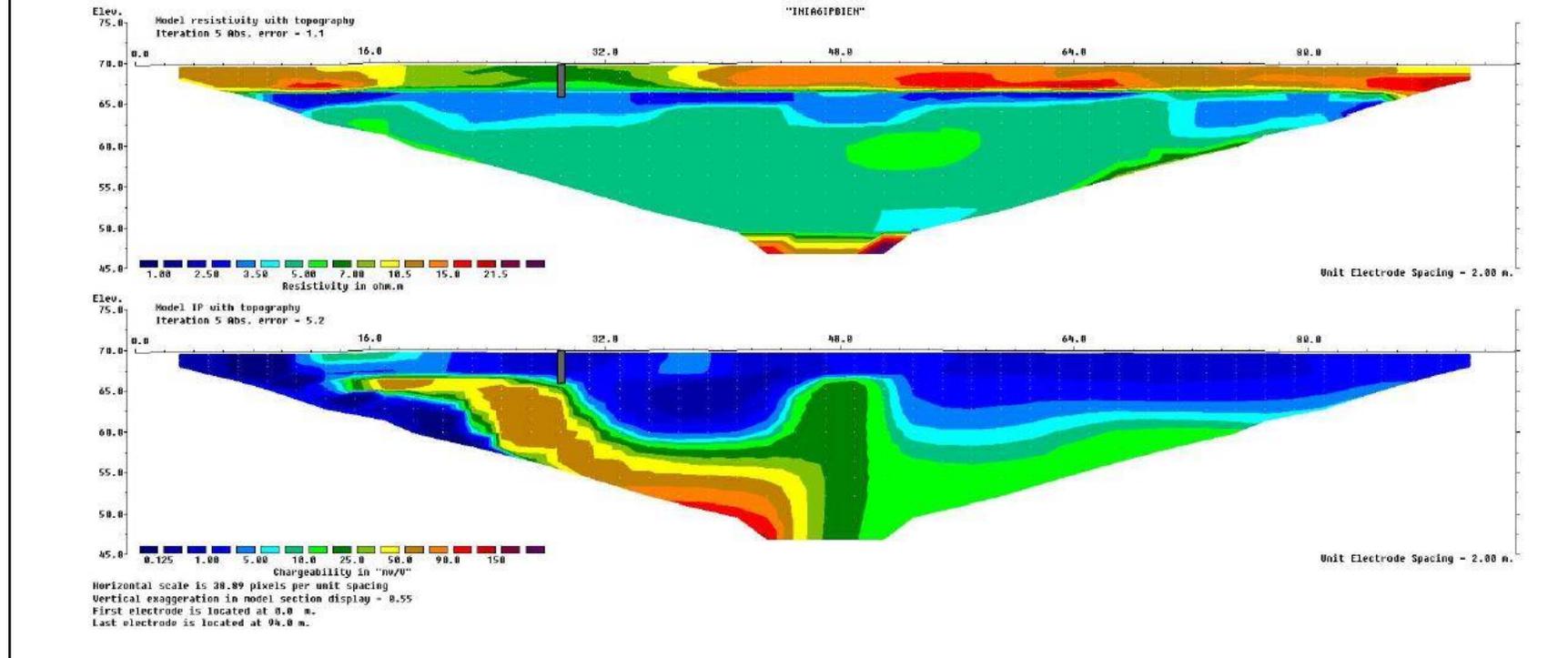


Figura 61: Perfiles de IP y ERT Dipolo Dipolo con perforación realizada en LG-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada

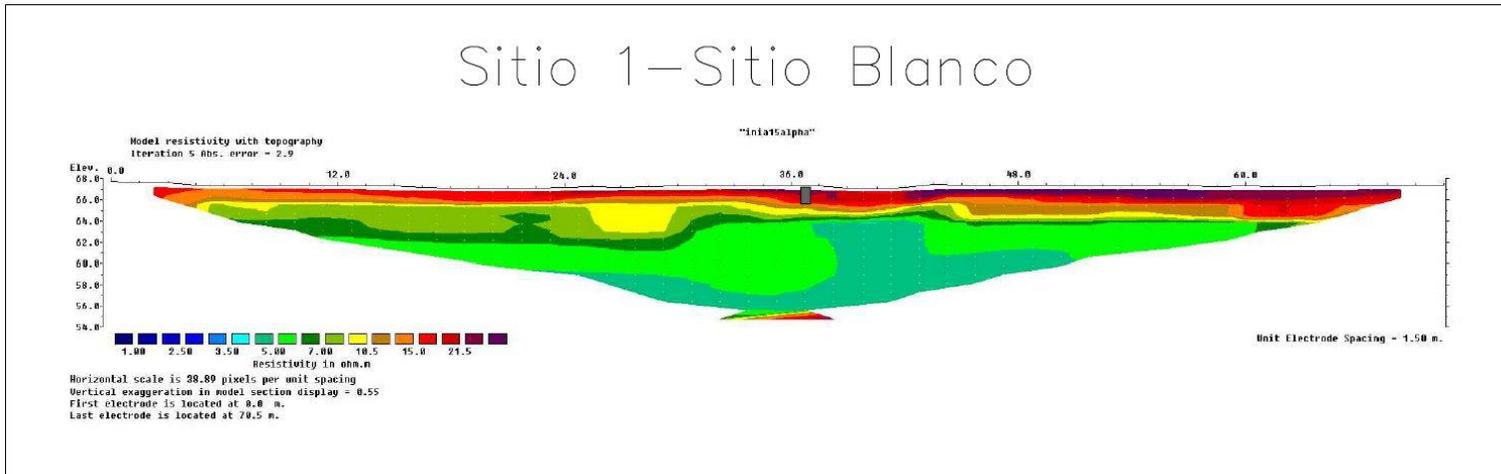


Figura 62: Perfil de ERT Schlumberger con perforación realizada en Sitio Blanco-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada

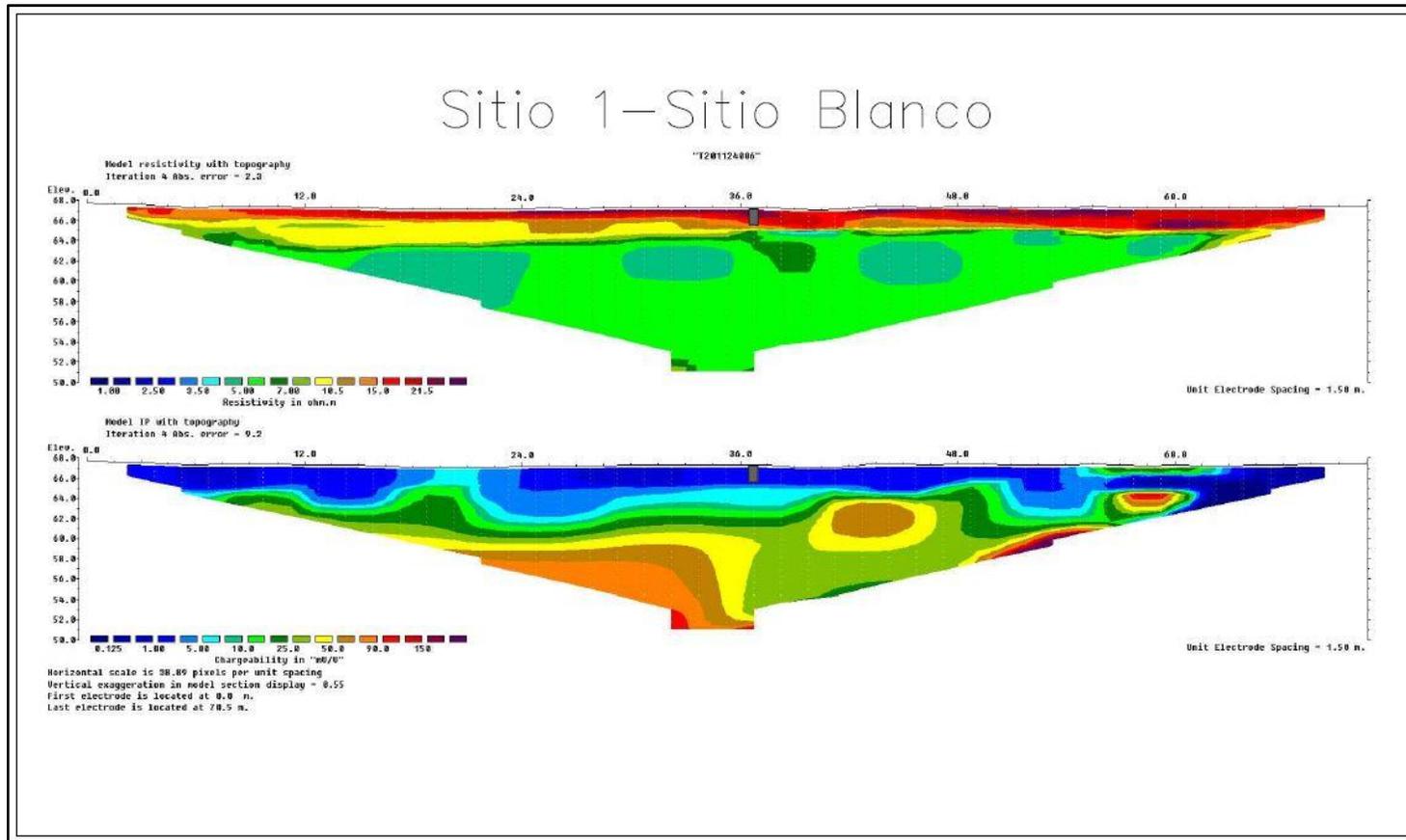


Figura 63: Perfiles de IP y ERT Dipolo Dipolo con perforación realizada en Sitio Blanco-Sitio 1. Línea gris representa la perforación realizada

4.3.1.1.1 Caracterización granulométrica

Como se mencionó en el capítulo 3.3, se realizó una caracterización de las muestras de suelo extraídas en los tres puntos siguiendo las normas ASTM. Las características de las muestras de suelo se detallan en la Tabla A.1 en el Anexo 7.3.1.1.

A modo de resumen, los tres puntos donde se extrajeron muestras de suelo a diferentes profundidades muestran que el medio se caracteriza por presentar limos y arcillas con alta plasticidad producto de la formación sedimentaria que prevalece en el sitio como lo es la Fm. Libertad. El Sitio Blanco a diferencia de las muestras obtenidas en ambas lagunas, presenta arcillas de baja plasticidad. Esto se debe a que el límite líquido es menor en las muestras obtenidas en el Sitio Blanco respecto a las lagunas. En función de la actividad de los minerales arcillosos definida por Skempton (1953) obtenida como el cociente entre el Índice de Plasticidad y el contenido de Arcilla de la muestra; para las arcillas de este sitio, se pueden clasificar como arcillas del tipo Illita. Esto se debe a que todas las muestras de la fracción fina presentan actividad mayor a 0.8. Sin embargo, para poder ser más concluyentes respecto a las especies de arcillas existentes, se debería realizar difracción de rayos X y análisis térmico diferencial.

4.3.1.1.2 Parámetros Químicos de suelo

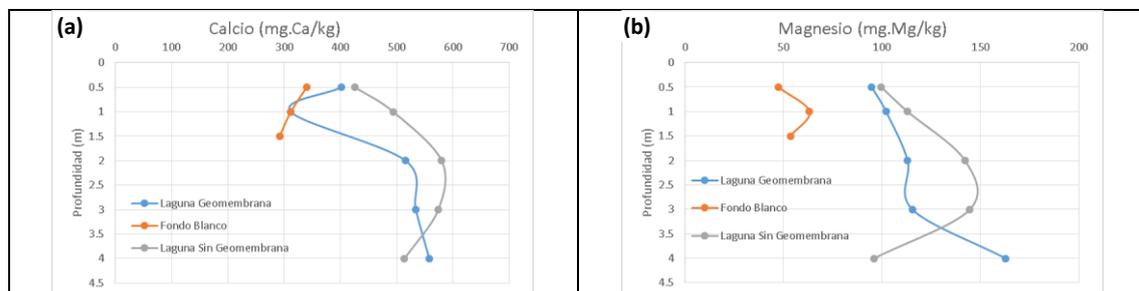
Los parámetros obtenidos para cada muestra para las diferentes profundidades se detallan en el Anexo 7.3.1.2.

En términos generales las muestras de suelos extraídas de ambas lagunas presentan mayor concentración de Calcio, Magnesio, Sodio intercambiable, Cloruro, Nitratos, Conductividad y pH del agua para todo el perfil respecto al Sitio Blanco como se muestra en la Figura 64. En el caso del Potasio intercambiable, se observa que LA es la que presenta mayores valores de concentración de este catión para los primeros 2 m de suelo. Esto es coherente con lo que plantea Sainato et al. (2010) en cuanto al aumento de estos componentes en suelo producto de la contaminación por efluente lechero.

El porcentaje de humedad es otro parámetro que mostró diferencias entre el Sitio Blanco y las lagunas. Esto es coherente debido a la presencia del efluente en superficie.

También es importante destacar que para LA y LG, la mayoría de los parámetros presentan un comportamiento diferencial por encima y debajo de los 2 m de profundidad. Los parámetros que más marcados tienen este comportamiento son los Cloruros, Conductividad eléctrica, Calcio y Potasio intercambiable para LA.

Es de destacar que para el carbono orgánico (%) no se registraron diferencias entre el Sitio Blanco y las lagunas.



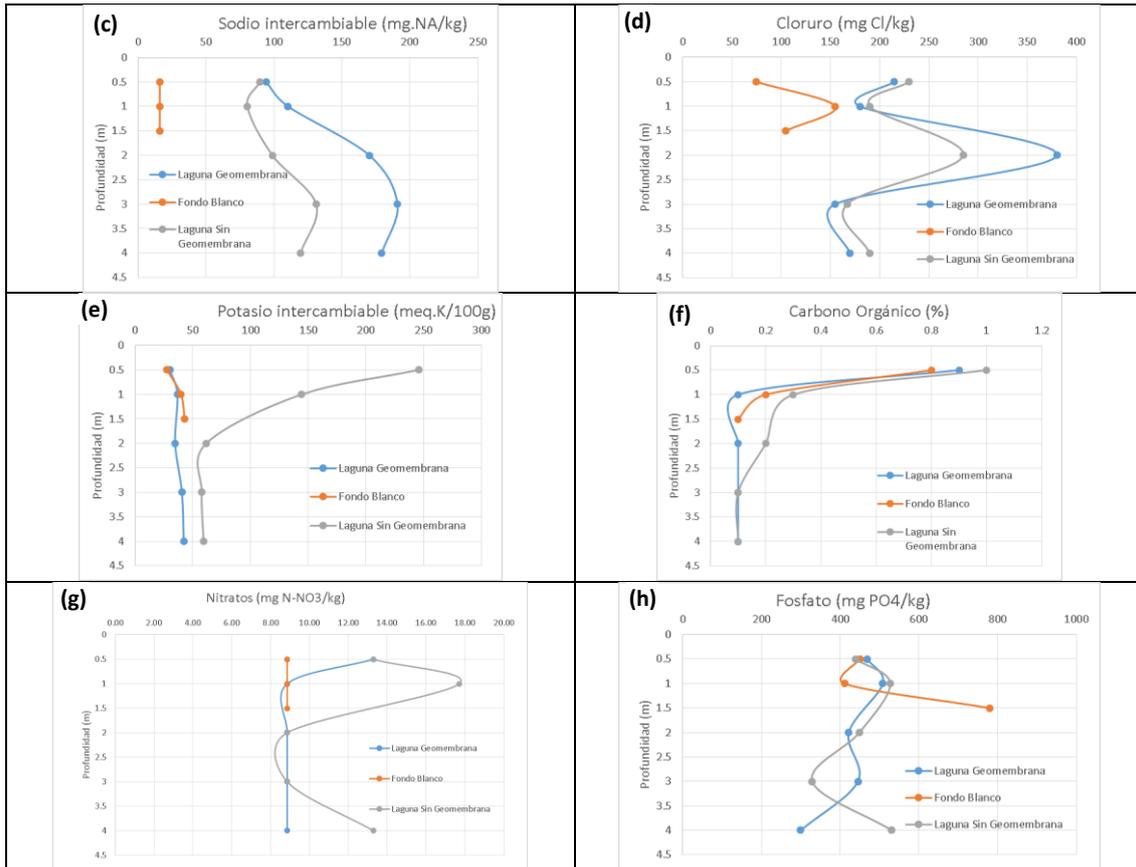


Figura 64: Parámetros químicos para los puntos de muestreo a diferente profundidad-Sitio 1. (a) Calcio (meq Ca/100g), (b) Magnesio (meq Ca/100g), (c) Sodio intercambiable (meq Na/100g), (d) Cloruro (ppm), (e) Potasio intercambiable (mg K/100g), (f) Carbono Orgánico (%), (g) Nitratos (mg N-NO₃), (h) Fosfatos (ppm PO₄).

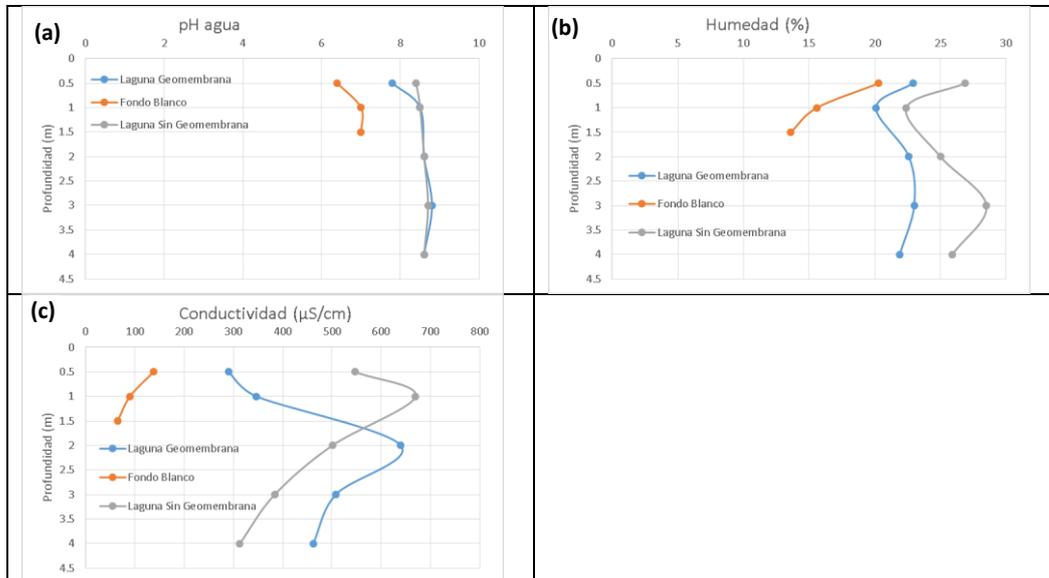


Figura 65: Parámetros físicos para los puntos de muestreo a diferente profundidad-Sitio 1. (a) pH del agua, (b) Humedad (%), (c) Conductividad (µS/cm).

4.3.1.2 Análisis de efluente en lagunas

Se colectaron muestras de las dos lagunas de almacenamiento de efluentes existente en el Sitio 1. En la Tabla 9 se muestran los parámetros analizados en el LAAI.

Tabla 9: Parámetros fisicoquímicos efluente LA y con LG. Sitio 1

Parámetro/Sitio	LA	LG
Nitrógeno (mg N-NO ₃ /l)	<2.5	<2.5

Nitrógeno amoniacal (mg/l N-NH ₃)	265	115
Nitrógeno total (NTK) (mg/l)	300.1	151.7
Ca (mg/l)	174.8	117.8
Alcalinidad (mg/l)	1896	1134
PO ₄ (mg P-PO ₄ /l)	14.5	5.8
Mg (mg/l)	77.9	15.6
K (mg/l)	332	115
Na (mg/l)	275	80
SO ₄ (mg/l)	7	<5
Cl (mg/l Cl)	385	170
Carbono Orgánico (mg/l)	1600	600
Conductividad (μS/cm)	4140	2350

Como puede observarse en la Tabla 9, LA presenta mayores concentraciones iónicas de las especies analizadas. En el caso de LG cuenta con un sistema de remoción de sólidos orgánicos mediante prensa extrusora. Hernández et al. (2019) realizaron un estudio de diferentes mecanismos de remoción de sólidos en sistemas de gestión de efluentes y uno de los sitios evaluados fue el INIA La Estanzuela. Para este sistema de prensa extrusora Hernández et al. (2019) midieron que se extrae aproximadamente el 87.5% de los sólidos volátiles y 13.7% de los sólidos totales. La prensa extrusora también retiene un porcentaje de los iones que se encuentran en el efluente. En particular se estableció que esta prensa extrusora remueve 1.14 % N en base seca, 0.2% P en base seca y 0.16% K en base seca. En LA no existe un sistema de remoción de sólidos que funcione eficientemente. Esto justifica las mayores concentraciones de la mayoría de las especies iónicas en LA respecto a LG y puede explicar la mayor concentración de Calcio, Magnesio, Potasio y Nitratos observados en las muestras de suelo de LA.

4.3.1.3 Análisis de agua subterránea

Los resultados de la muestra de agua subterránea que se encuentra aguas abajo de ambas lagunas se detallan en la Tabla 10. El error analítico de la muestra del agua subterránea es del 5.7%, siendo aceptable como establece Custodio y Llamas (2001).

Tabla 10: Parámetros Fisicoquímicos de agua subterránea perforación INIA.

Parámetro	
pH	7
CE(μS/cm)	1200
T(°C)	18
STS (mg/l)	24
MOS (mg/l)	40
Alcalinidad (mg CaCo ₃ l)	415.4
Fl (mg/l)	0.45
Cl (mg/l)	42.58
Br (mg/l)	0.14
NO ₃ (mg/l)	25.55
PO ₄ (mg/l)	ND
SO ₄ (mg/l)	36.70
HCO ₃ (mg/l)	506.8
CO ₃ (mg/l)	ND
Dureza total (mg/l)	280.4
Ca (mg/l)	53.97

Mg (mg/l)	35.33
Na (mg/l)	113.5
K (mg/l)	54.6

En la Figura 66 se muestra el diagrama Stabler, donde se observa una elevada concentración de Sodio, Calcio, Magnesio y Cloruro.

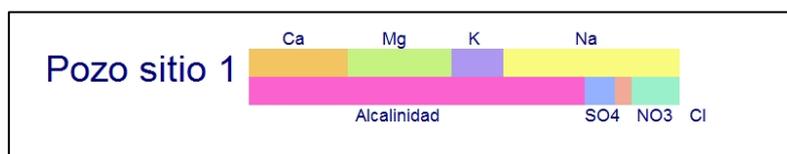


Figura 66: Diagrama Stabler Sitio 1

Según el diagrama de Piper (1953) (Figura 67) el agua de la perforación de abastecimiento tiene características de bicarbonatadas sódicas.

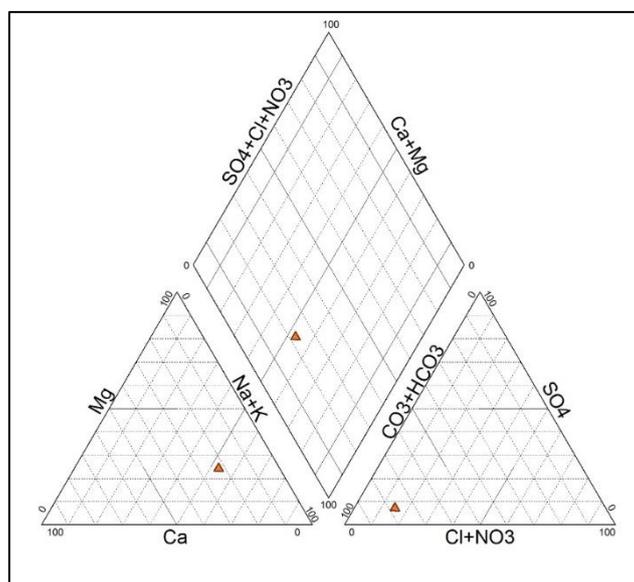


Figura 67: Diagrama de Piper Agua de abastecimiento INIA La Estanzuela.

A partir del diagrama de Schoeller (1962) (Figura 68) se observa que el agua presenta altos contenidos de bicarbonatos, lo cual es coherente con el intercambio que se puede dar entre el agua de lluvia de recarga y la formación sedimentaria existente en la zona.

También se observan valores elevados de concentración de Potasio y Nitratos. Las aguas subterráneas no suele superar los 5 mg/l de Potasio (Davis y De Wiest, 1966). Cuando presenta concentraciones mayores a 10 mg/l, se puede asociar a la salmuera. La existencia natural del Potasio se debe a la disolución de la ortosa y otros silicatos como las micas, arcillas, entre otros. También se puede deber a contaminación industrial, minera y agrícola por fertilizantes y abono orgánico (Custodio y Llamas, 2001). En función de lo descrito en GeoAmbiente (2018) para una perforación cercana al sitio (1.2 km de distancia), la roca que se encuentra en el lugar se caracteriza por presentar minerales como la plagioclasa, cuarzo y mica. Sin embargo, para que el agua subterránea presente concentraciones tan elevadas de Potasio, se deberían estar captando líneas de flujo con mucho tiempo de tránsito en el medio y con un grado de alteración muy elevado.

Respecto a los Nitratos, Babiker (2004), establece que el límite en el que se puede considerar que existe contaminación producto de la actividad antrópica es de aproximadamente 13 mg/l. En este caso, la concentración de nitratos es de 25.55 mg/l.

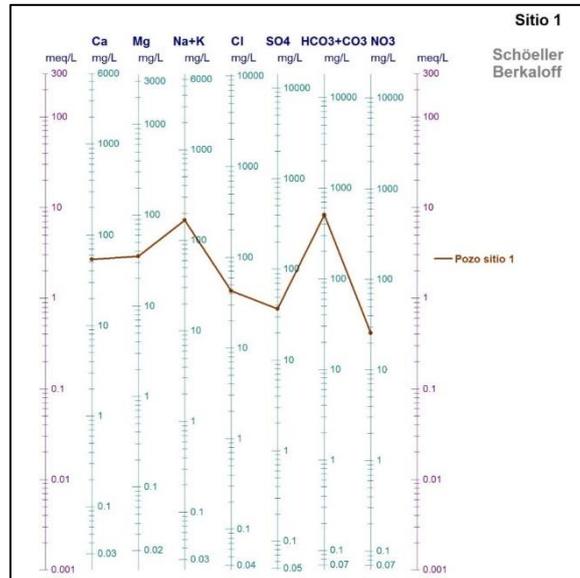


Figura 68: Diagrama de Schoeller Agua de abastecimiento INIA La Estanzuela.

4.3.2 Sitio 2

4.3.2.1 Análisis de suelos

Las perforaciones realizadas respecto a los perfiles de resistividad para el arreglo Schlumberger y cargabilidad se muestran en la Figura 69 y Figura 72. La selección de los sitios de muestreo se basó en el criterio de muestrear donde se observaron anomalías geofísicas con un comportamiento similar al obtenido en el Sitio 1 y donde pudieran existir infiltraciones desde las lagunas en función del gradiente topográfico.

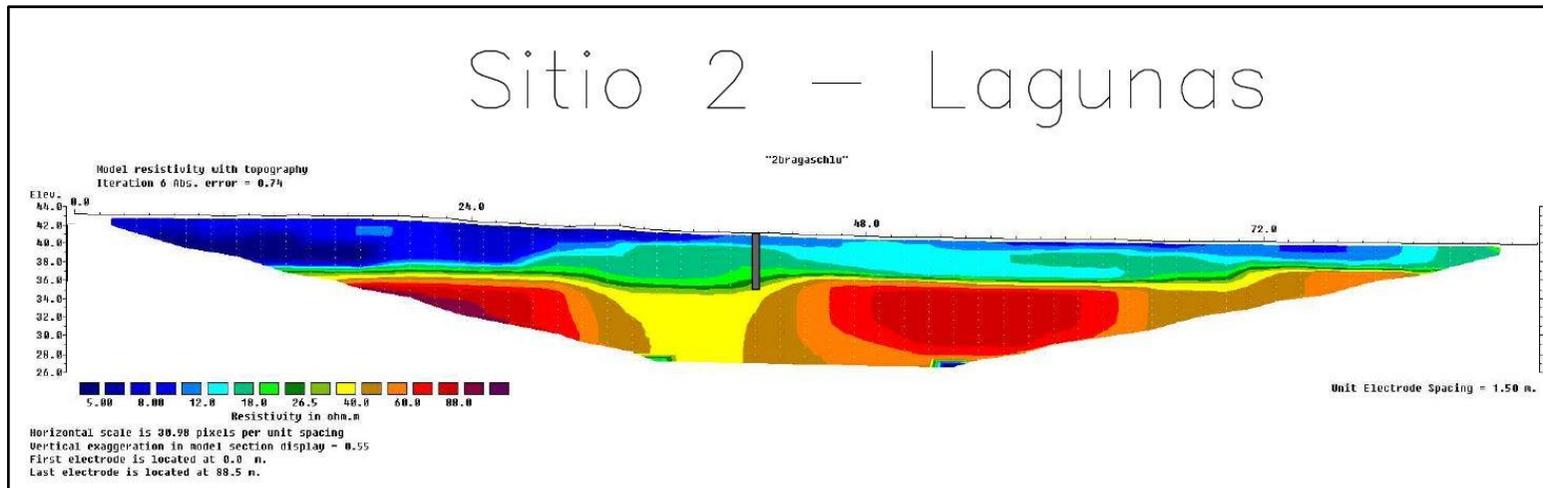


Figura 69: Perfil de ERT Schlumberger con perforación realizada en zona de Lagunas-Sitio 2. Línea gris representa la perforación realizada

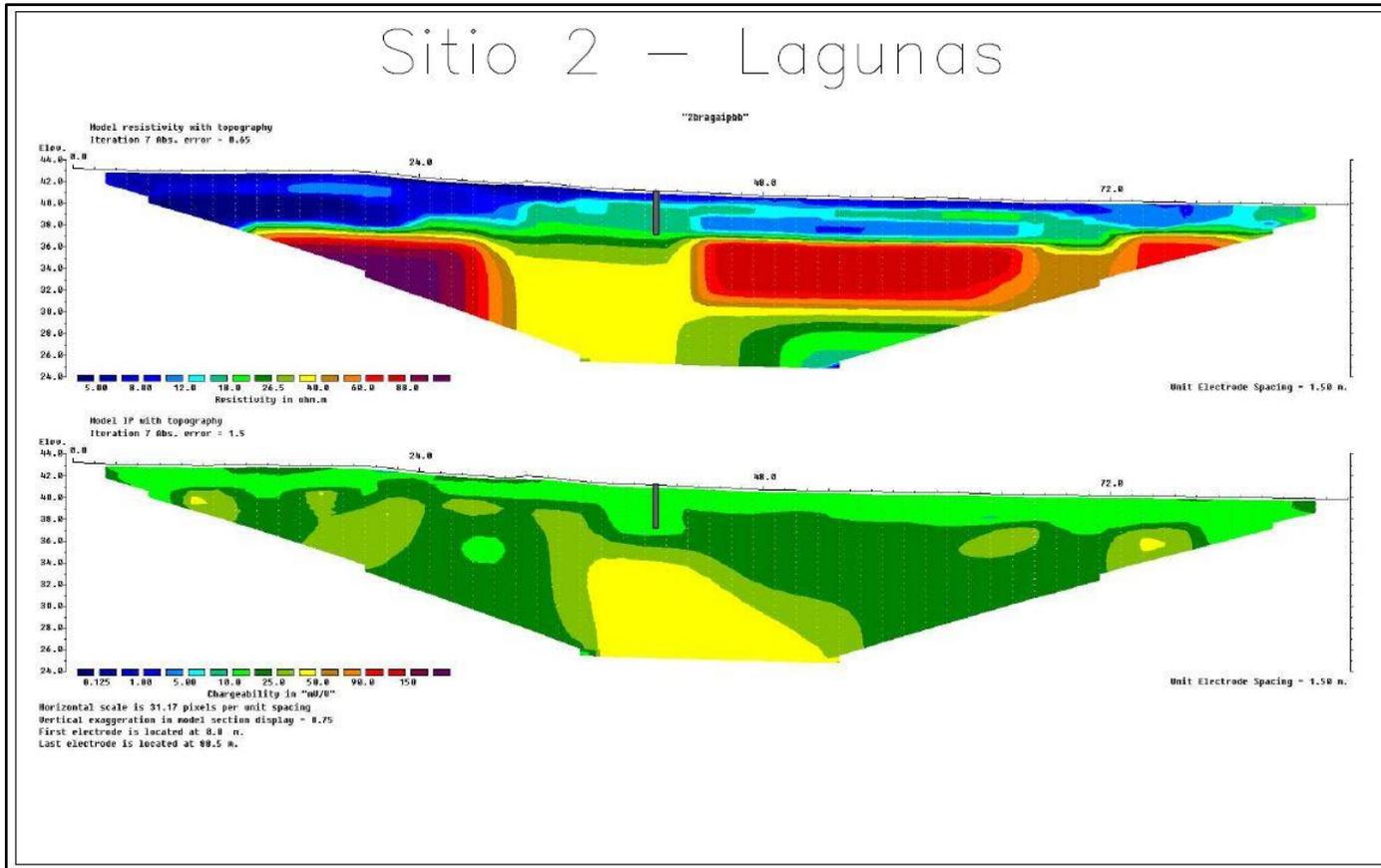


Figura 70: Perfiles de IP y ERT Dipolo Dipolo con perforación realizada zona de Lagunas-Sitio 2. Línea gris representa la perforación realizada

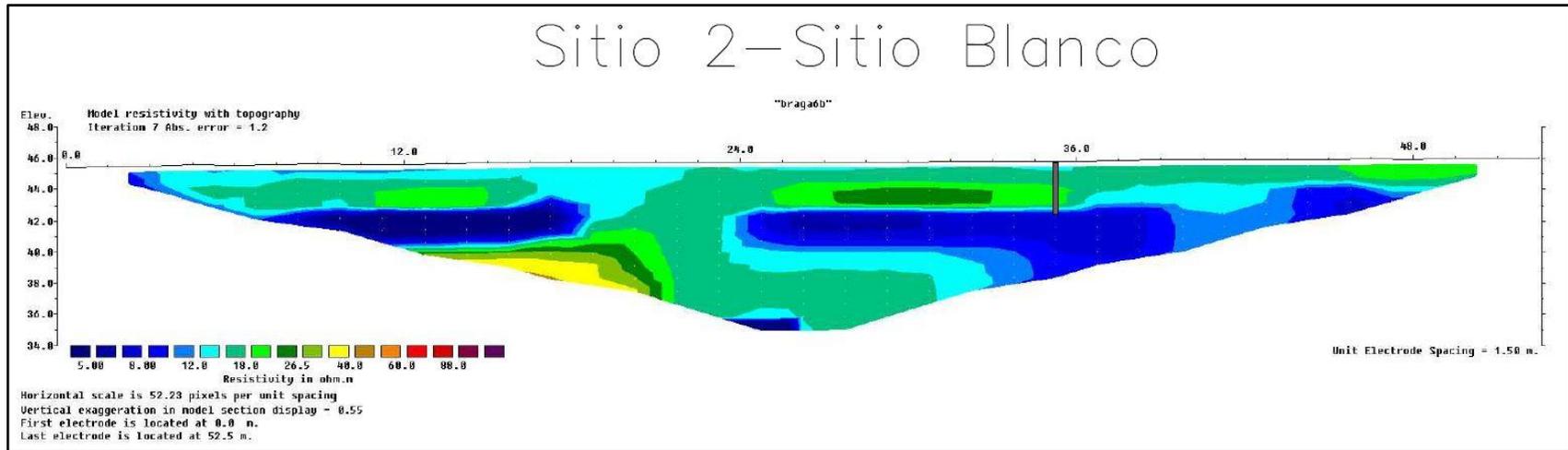


Figura 71: Perfil de ERT Schlumberger con perforación realizada en zona de Sitio Blanco-Sitio 2. Línea gris representa la perforación realizada.

Sitio 2-Sitio Blanco

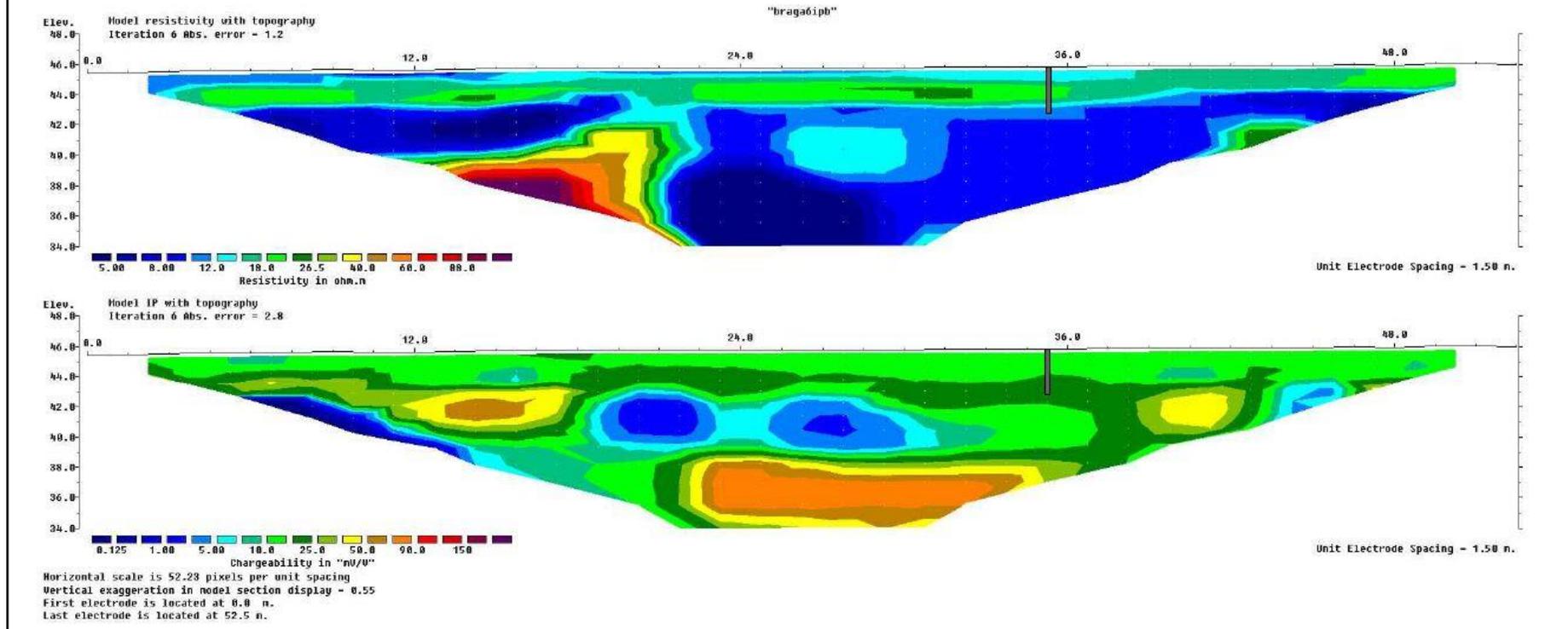


Figura 72: Perfiles de IP y ERT Dipolo Dipolo con perforación realizada zona de Sitio Blanco-Sitio 2. Línea gris representa la perforación realizada

4.3.2.1.1 Caracterización granulométrica

Como se mencionó en el capítulo 3.3, se realizó una caracterización de las muestras de suelo extraídas en los dos puntos siguiendo las normas ASTM. Las características de las muestras de suelo se detallan en la Tabla A.3 en el Anexo 7.3.2.

A modo de resumen, los dos puntos donde se extrajeron muestras de suelo a diferentes profundidades muestran que los suelos son arcillosos en superficie y que el contenido de arena aumenta en profundidad. En el caso de la zona de lagunas aproximadamente a los 3 m de profundidad, el contenido de arenas finas a medias es de alrededor del 50%. Para el caso del Sitio Blanco el contraste entre suelo arcilloso y arenas es más notable entre los 2 m y 3 m de profundidad. El perfil obtenido en los muestreos realizados es consistente con la geología predominante de la zona, donde se encuentra la Fm. Libertad en superficie y la Fm. Raigón a partir de los 3 m de profundidad aproximadamente. En función de la actividad de Skempton (1953), las arcillas de este sitio se pueden clasificar como arcillas del tipo Caolinita. Esto se debe a que presentan actividad menor a 0.75 en todos los casos. Sin embargo, para poder ser más concluyentes al respecto, como se mencionó anteriormente, se deberían realizar ensayos más específicos.

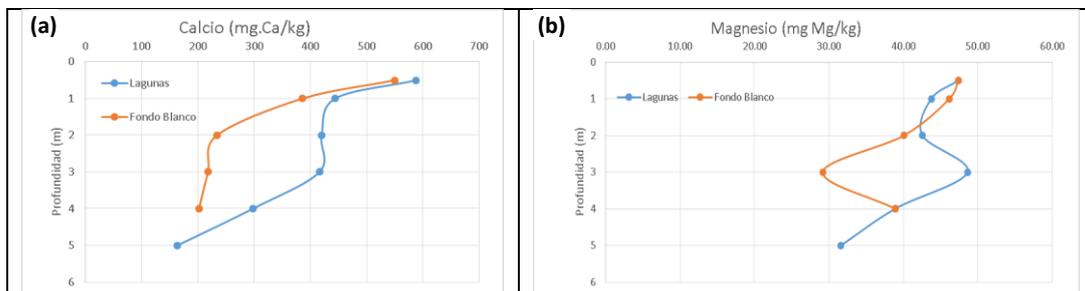
4.3.2.1.2 Parámetros Físicoquímicos de suelo

Los parámetros obtenidos para cada muestra para las diferentes profundidades se detallan en el Anexo 7.3.2.2.

En términos generales las muestras de suelos extraídas en ambos sitios presentan un comportamiento diferencial entre sí. En la zona de lagunas presentan un marcado aumento de los Nitratos, Cloruros y Fosfatos a partir de los 3 m de profundidad. Por el contrario, el Sitio Blanco presenta un aumento puntual de la concentración de Fosfato, Cloruros, Sodio, Nitratos y Potasio a los 2 m de profundidad. Inclusive presenta mayores concentraciones respecto a la zona de Lagunas para esta profundidad.

El porcentaje de humedad tiene un comportamiento muy similar en ambos sitios, donde el mayor porcentaje de humedad se da en superficie. Es de destacar que en la zona de Lagunas a partir de los 4m se constató un aumento de humedad de las muestras en campo. Si bien esto no es reflejado en los porcentajes de humedad obtenidos en laboratorio, se puede deber a que son muestras con alto contenido de arenas y la humedad descienda rápidamente en la manipulación.

Es de destacar que para el carbono orgánico (%) no se registraron diferencias entre el Sitio Blanco y la zona de las lagunas.



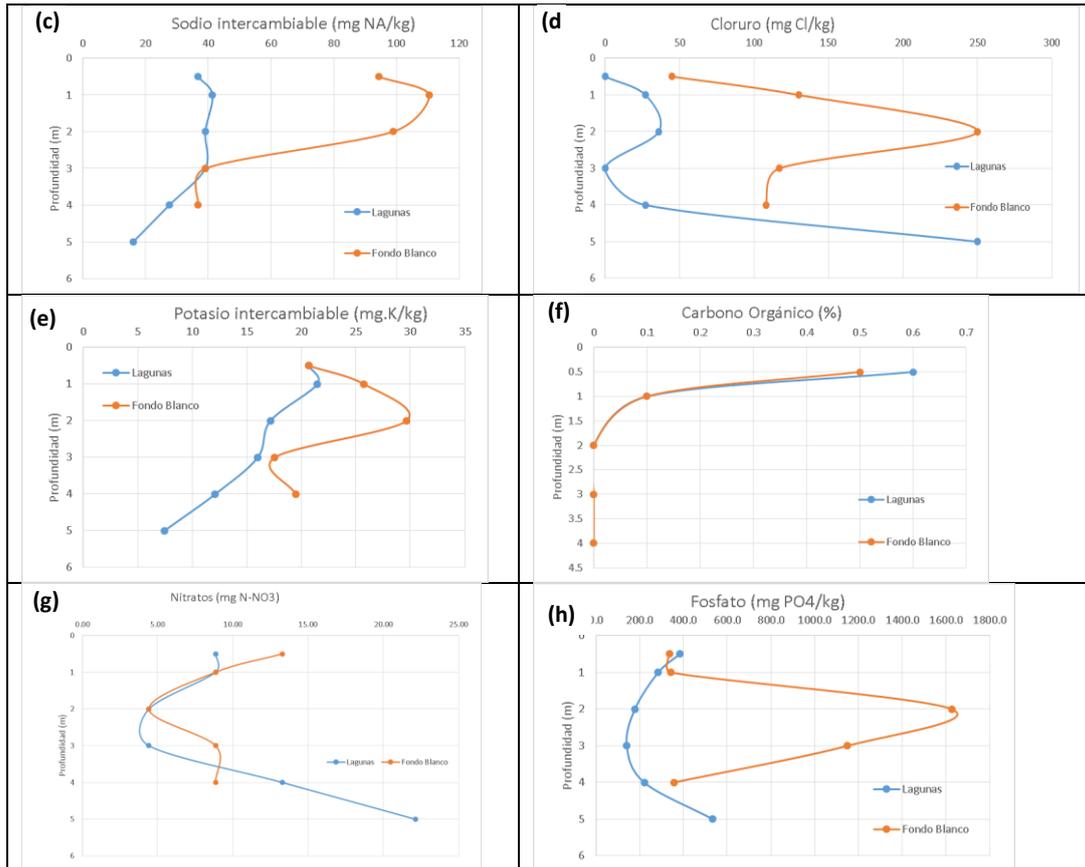


Figura 73: Parámetros químicos para los puntos de muestreo a diferente profundidad-Sitio 2. (a) Calcio (meq Ca/100g), (b) Magnesio (meq Ca/100g), (c) Sodio intercambiable (meq Na/100g), (d) Cloruro (ppm), (e) Potasio intercambiable (mg K/100g), (f) Carbono Orgánico (%), (g) Nitratos (mg N-NO₃), (h) Fosfatos (ppm PO₄).

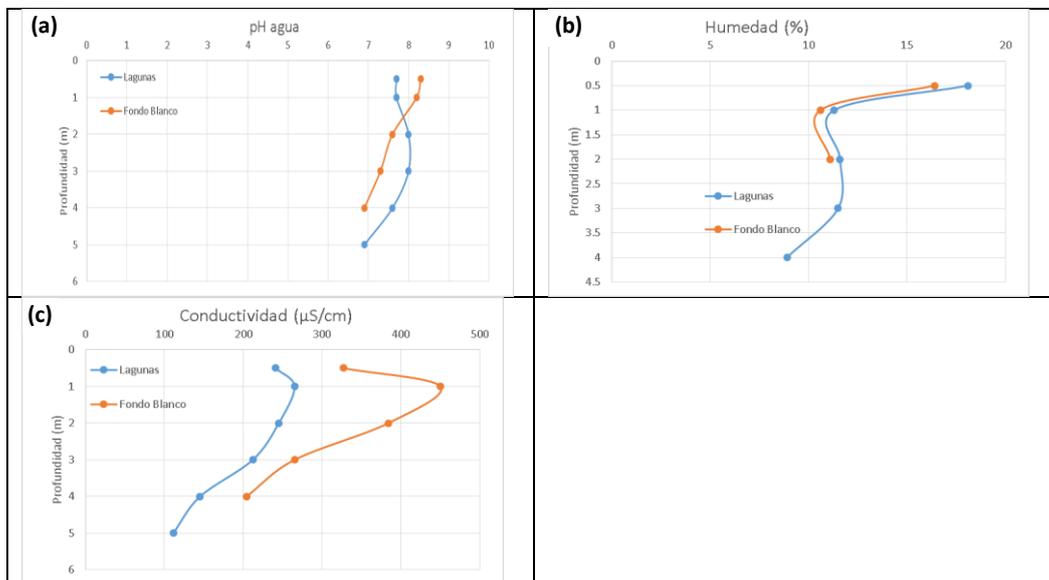


Figura 74: Parámetros físicos para los puntos de muestreo a diferente profundidad-Sitio 2. (a) pH del agua, (b) Humedad (%), (c) Conductividad (µS/cm).

4.3.2.2 Análisis de efluente en lagunas

Se colectaron muestras de la laguna de almacenamiento de efluentes existente en el Sitio 2 denominada como Laguna 2 en la Figura 25. En la Tabla 11 se muestran los parámetros analizados en el laboratorio Ecotech.

Tabla 11: Parámetros fisicoquímicos efluente Laguna. Sitio 2

Parámetro	
Nitrógeno (mg N-NO ₃ /l)	<2
Nitrógeno amoniacal (mg/l N-NH ₃)	170
Nitrógeno total (NTK) (mg/l)	181
Ca (mg/l)	136
Alcalinidad (mg/l)	1476
PO ₄ (mg P-PO ₄ /l)	93
Mg (mg/l)	101
K (mg/l)	309
Na (mg/l)	255
SO ₄ (mg/l)	4.7
Cl (mg/l Cl)	245
Carbono Orgánico (mg/l)	313
Conductividad (μS/cm)	4230

4.3.2.3 Análisis de agua subterránea

Los resultados de las muestras de agua subterránea se detallan en la Tabla 10. El error analítico de las muestras de agua subterránea son de 2.1% y 1.8% para la perforación Abastecimiento y Brocal respectivamente, siendo aceptable como establece Custodio y Llamas (2001).

Tabla 12: Parámetros Fisicoquímicos de agua subterránea perforaciones Sitio 2.

Parámetro	Perforación Abastecimiento	Perforación Brocal
pH	7.18	7
CE(μS/cm)	1177	1359
T(°C)	19.4	19.7
STS (mg/l)	0	0
MOS (mg/l)	0	0
Alcalinidad (mg CaCO ₃)	379.4	486.5
Fl (mg/l)	0.3079	0.1602
Cl (mg/l)	115.9	133.76
Br (mg/l)	0.3771	0.3797
NO ₃ (mg/l)	78.80	95.62
PO ₄ (mg/l)	ND	ND
SO ₄ (mg/l)	78.3582	240.1081
HCO ₃ (mg/l)	462.8	593.5
CO ₃ (mg/l)	ND	ND
Dureza total (mg/l)	257.8	421.9
Ca (mg/l)	77.4057	142.4906
Mg (mg/l)	13.2951	48.9884
Na (mg/l)	214.618	219.0615
K (mg/l)	ND	ND

Según el diagrama Stabler (Figura 75) las perforaciones del Sitio 2 tienen una elevada concentración de los iones Cloruros y Nitratos. El sulfato también presenta una elevada concentración en el Sitio 2, en particular para la perforación de brocal.

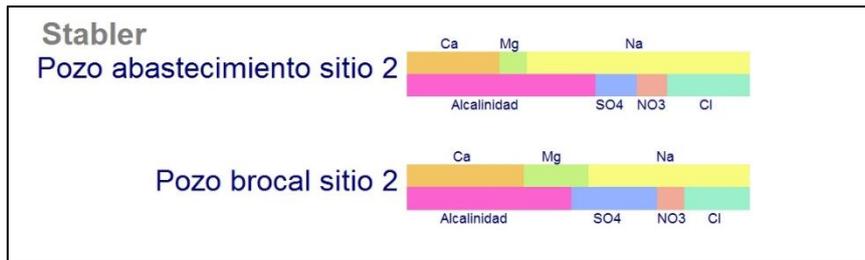


Figura 75: : Diagrama Stabler perforaciones Sitio 1 y Sitio 2

Según el diagrama de Piper (1953) (Figura 76) el agua de las perforaciones del Sitio 2 tienen características de bicarbonatadas sódicas y parecen indicar procesos de mezcla.

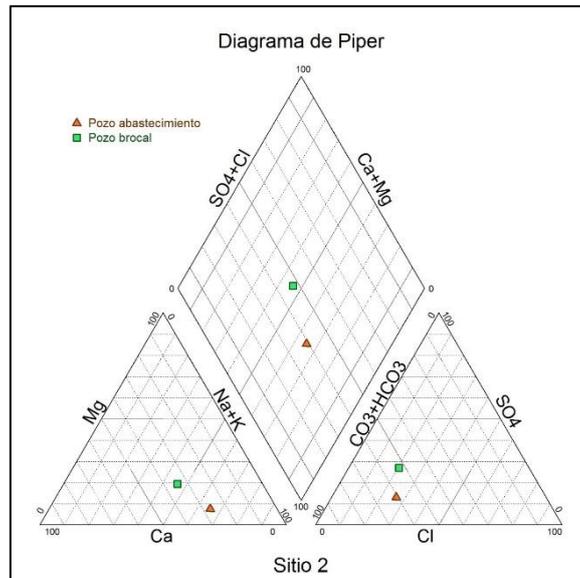


Figura 76: Diagrama de Piper agua de perforaciones Sitio 2.

A partir del diagrama de Schoeller (1962) (Figura 77) se observa que el agua presenta altos contenidos de bicarbonatos, lo cual es coherente con el intercambio que se puede dar entre el agua de lluvia de recarga y la formación sedimentaria existente en la zona.

También se observan valores elevados de concentración de potasio y nitratos, por encima del límite establecido por Babiker (2004) de 13 mg/l para Nitratos para determinar contaminación por actividad antrópica. Lo que se destaca en este diagrama al igual que para el diagrama Stabler es la elevada concentración del ión Cloruro, Nitrato y Sulfato.

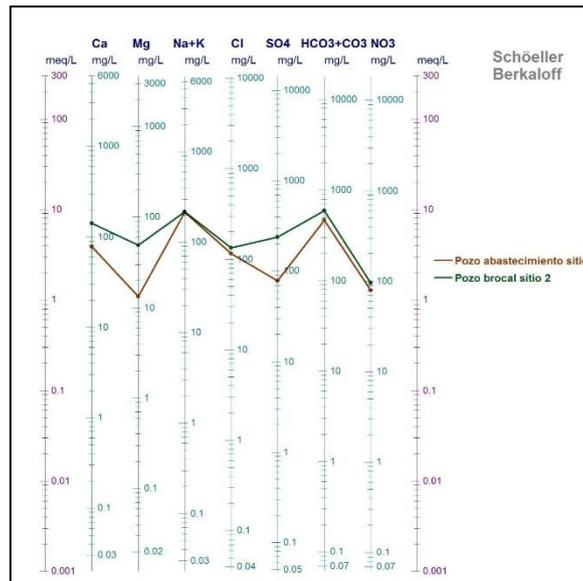


Figura 77: Diagrama de Schoeller Agua de perforaciones Sitio 2.

Se obtuvo información de los iones Cloruro, Nitrato y Sulfato de una perforación cercana (Pozo cercano) y en la Figura 78 se muestra su concentración respecto a las perforaciones del Sitio 2. En esta figura se puede observar que las muestras del agua subterránea del Sitio 2, presentan mayores valores de estos iones respecto a la perforación que se encuentra cercana al sitio, a pesar que todas las perforaciones captan agua de la misma formación geológica y a la misma profundidad. Esto podría indicar que el agua subterránea del Sitio 2 presenta contaminación de forma local.

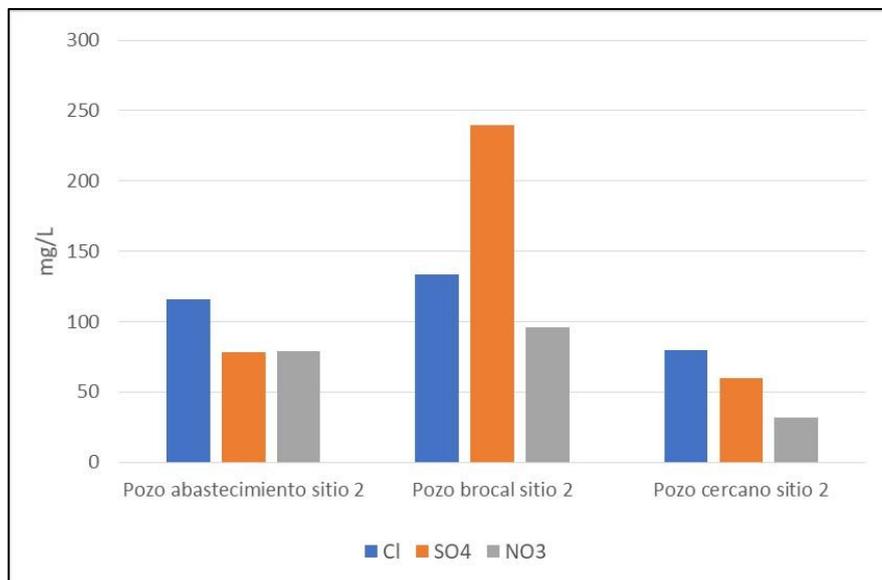


Figura 78: Concentración ión Cloruro, Sulfato y Nitratos para las perforaciones del Sitio 2 y Sitio cercano

4.4 Correlación Geofísica-Parámetros fisicoquímicos

En este capítulo se muestran las correlaciones establecidas entre los diferentes parámetros fisicoquímicos y los valores de resistividad o cargabilidad obtenidos mediante doble filtrado para cada sitio. Los parámetros fisicoquímicos de suelo se consideran la variable independiente (Xi) mientras que los parámetros geofísicos se consideran la variable dependiente (Yi).

4.4.1.1 Sitio 1

Para el caso de la resistividad se muestran los ajustes obtenidos con el arreglo Schlumberger en la Figura 79. Los ajustes obtenidos para los arreglos electródicos Wenner Alpha, Wenner Beta, Wenner Schlumberger y Dipolo Dipolo se muestran en el Anexo 7.6.1. En la Figura 80, se muestra la regresión entre los valores de cargabilidad obtenidos y los parámetros fisicoquímicos. En la Tabla 13 a Tabla 21 se muestra un resumen de los parámetros de correlación obtenidos con ajuste pesado WLS entre los parámetros fisicoquímicos y geofísicos para los diferentes arreglos electródicos practicados.

En función de lo observado para el ajuste obtenido mediante mínimos cuadrados entre la resistividad con el arreglo Schlumberger y los parámetros fisicoquímicos, se puede indicar que los datos presentan dispersión e inclusive algunos datos se pueden considerar datos anómalos u outliers como se explicó en el capítulo 2.7.1. Esto se puede deber a errores experimentales. Por este motivo, algunos gráficos presentan menor número de datos experimentales del total de datos colectados (13).

Todas las regresiones empleando pesos (WLS), obtuvieron mejores parámetros estadísticos respecto a la regresión ordinaria lineal (OLS), como era esperable. Las regresiones que presentaron mayor correlación con la resistividad fueron pH, Calcio, Magnesio, Cloruros, Humedad y Fosfatos. La menor correlación se obtuvo con los Nitratos y el Potasio. Este análisis se define en función del valor de r^2 cercano a 1 y el menor valor de p (menor a 0.05), que indica la probabilidad de no rechazar la hipótesis nula de que la pendiente de la recta sea cero. Por lo tanto, altos valores de r^2 y bajos valores de p indican mayor correlación entre las variables. Respecto a los boxplots de los residuales de la regresión considerando pesos (WLS), existen outliers que no permiten asegurar la normalidad de los residuales.

Realizando un análisis similar al realizado para la resistividad, para la cargabilidad se puede observar una relación polinómica de orden 2 con el Potasio, Calcio y Magnesio. Para el resto de los parámetros fisicoquímicos, no se puede establecer ningún tipo de correlación, ya que los coeficientes de Pearson son muy bajos y los p valor para la pendiente de la recta considerablemente mayor a 0.05. Lo mismo ocurre con los boxplots de los residuales, que no cumplen con la distribución normal.

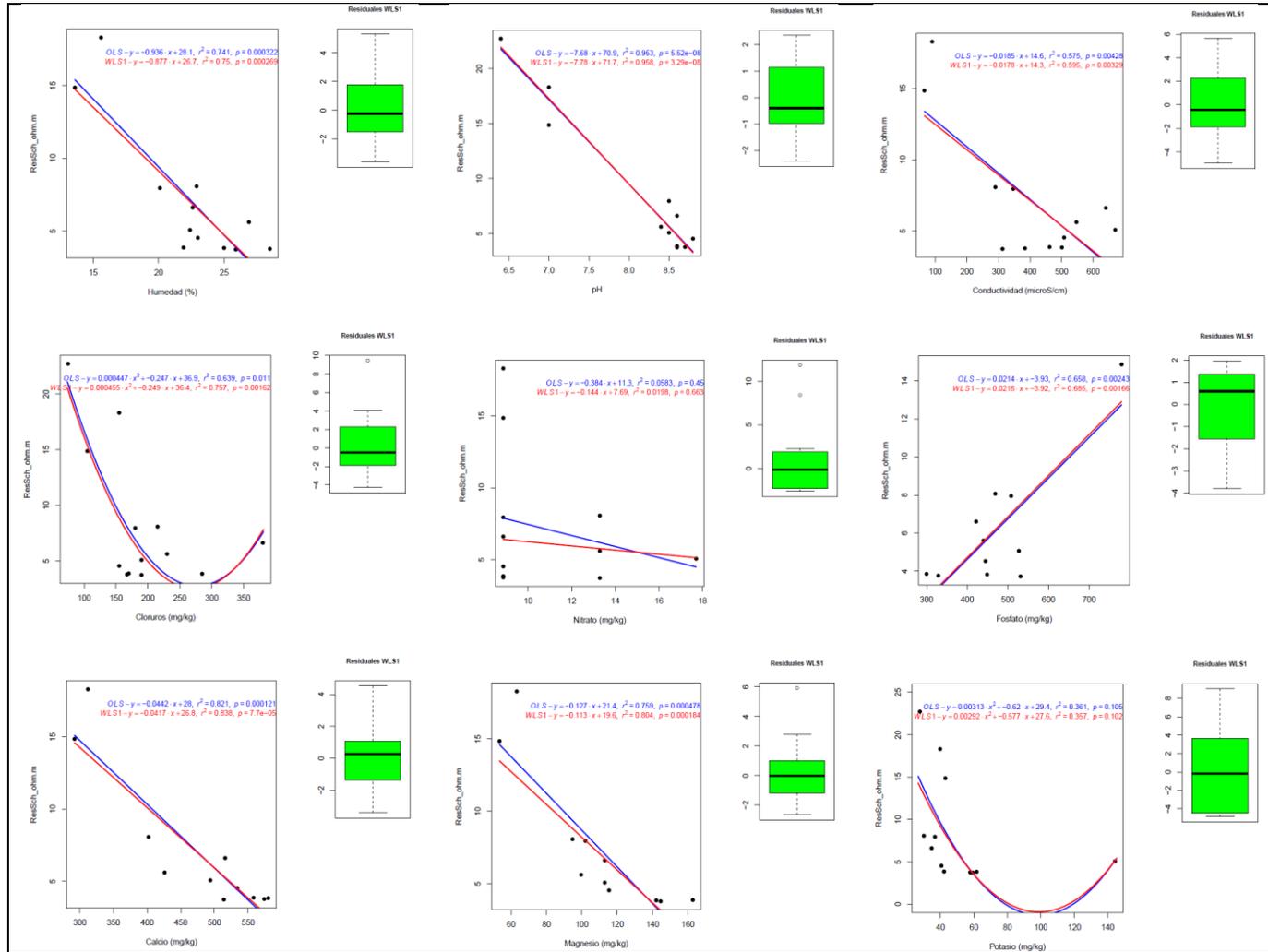


Figura 79: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad mediante arreglo Schlumberger. OLS (azul), WLS (rojo).

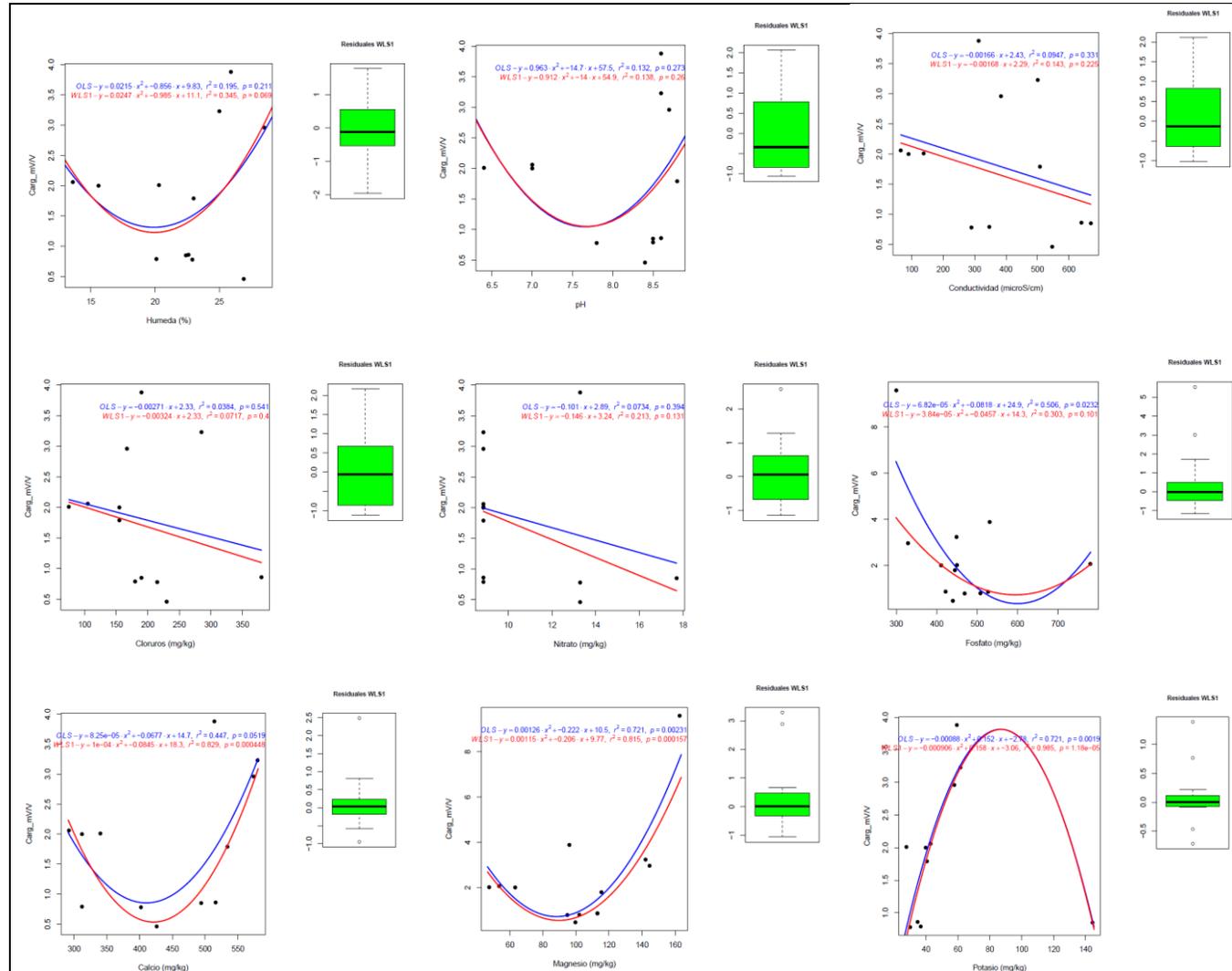


Figura 80: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y cargabilidad. Ajuste lineal ordinario (azul), Ajuste por pesos (rojo).

Tabla 13: Correlación Humedad y parámetros Geofísicos

Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Resistividad					Cargabilidad
	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r ²	0.75	0.745	0.72	0.695	0.785	0.345
p valor pendiente recta	0.000269	0.00298	0.000487	0.00075	0.000125	0.0609

Tabla 14: Correlación pH y parámetros Geofísicos

Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Resistividad					Cargabilidad
	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r ²	0.958	0.959	0.956	0.961	0.952	0.138
p valor pendiente recta	3.29x10 ⁻⁸	2.97x10 ⁻⁸	4.09x10 ⁻⁸	2.32x10 ⁻⁸	6.72x10 ⁻⁸	0.26

Tabla 15: Correlación Conductividad y parámetros Geofísicos

Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Resistividad					Cargabilidad
	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r ²	0.595	0.583	0.596	0.547	0.531	0.143
p valor pendiente recta	0.00329	0.00385	0.00327	0.00597	0.00721	0.225

Tabla 16: Correlación Cloruros y parámetros Geofísicos

Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Resistividad					Cargabilidad
	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r ²	0.757	0.784	0.78	0.72	0.81	0.0717
p valor pendiente recta	0.00162	0.0096	0.00113	0.00249	0.000401	0.4

Tabla 17: Correlación Nitratos y parámetros Geofísicos

Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Resistividad					Cargabilidad
	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo

r²	0.0198	0.0168	0.0177	0.0173	0.0296	0.213
p valor pendiente recta	0.663	0.688	0.68	0.683	0.613	0.131

Tabla 18: Correlación Fosfatos y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r²	0.685	0.681	0.675	0.623	0.677	0.303
p valor pendiente recta	0.00166	0.00176	0.00193	0.00389	0.00187	0.101

Tabla 19: Correlación Calcio y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r²	0.838	0.832	0.819	0.799	0.783	0.829
p valor pendiente recta	7.7x10 ⁻⁵	9.03x10 ⁻⁵	0.000129	0.000208	0.000294	0.000448

Tabla 20: Correlación Magnesio y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r²	0.804	0.793	0.754	0.795	0.674	0.815
p valor pendiente recta	0.000184	0.000235	0.000249	0.000229	0.00106	0.000157

Tabla 21: Correlación Potasio y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r²	0.357	0.352	0.344	0.363	0.309	0.985
p valor pendiente recta	0.102	0.106	0.116	0.097	0.146	1.18x10 ⁻⁵

4.4.1.2 Sitio 2

Para el caso de la resistividad se muestran los ajustes obtenidos con el arreglo Schlumberger en la Figura 81. Los ajustes obtenidos para los arreglos electródicos Wenner Alpha, Wenner Beta, Wenner Schlumberger y Dipolo Dipolo se muestran en el Anexo 7.6.2. En la Figura 82, se muestra la regresión entre los valores de cargabilidad obtenidos y los parámetros fisicoquímicos. En la Tabla 22 a Tabla 30 se muestra un resumen de los parámetros de correlación obtenidos con ajuste pesado WLS entre los parámetros fisicoquímicos y geofísicos para los diferentes arreglos electródicos practicados.

En función de lo observado para el ajuste obtenido mediante mínimos cuadrados entre la resistividad con el arreglo Schlumberger y los parámetros fisicoquímicos, se puede indicar que los datos presentan dispersión. Esto se puede deber a errores experimentales. Por este motivo, algunos gráficos presentan menor número de datos experimentales del total de datos colectados (11). Todas las regresiones empleando pesos (WLS), obtuvieron mejores parámetros estadísticos respecto a la regresión ordinaria lineal (OLS), como era esperable.

Las regresiones que presentaron mayor correlación con la resistividad fueron Calcio, Nitratos, Potasio y Humedad. La menor correlación se obtuvo con el pH. Este análisis se definió al igual que para el Sitio 1 en función del valor de r^2 cercano a 1 y valores de p menores a 0.05. Respecto a los boxplots de los residuales de la regresión considerando pesos (WLS1), existen outliers que no permiten asegurar la normalidad de los residuales.

Para la cargabilidad se obtuvieron las mayores correlaciones para la Conductividad, Cloruro, Fosfatos, Nitratos, Potasio y Calcio. Para el resto de los parámetros fisicoquímicos, no se puede establecer ningún tipo de correlación. Lo mismo ocurre con los boxplots de los residuales, que no cumplen con la distribución normal.

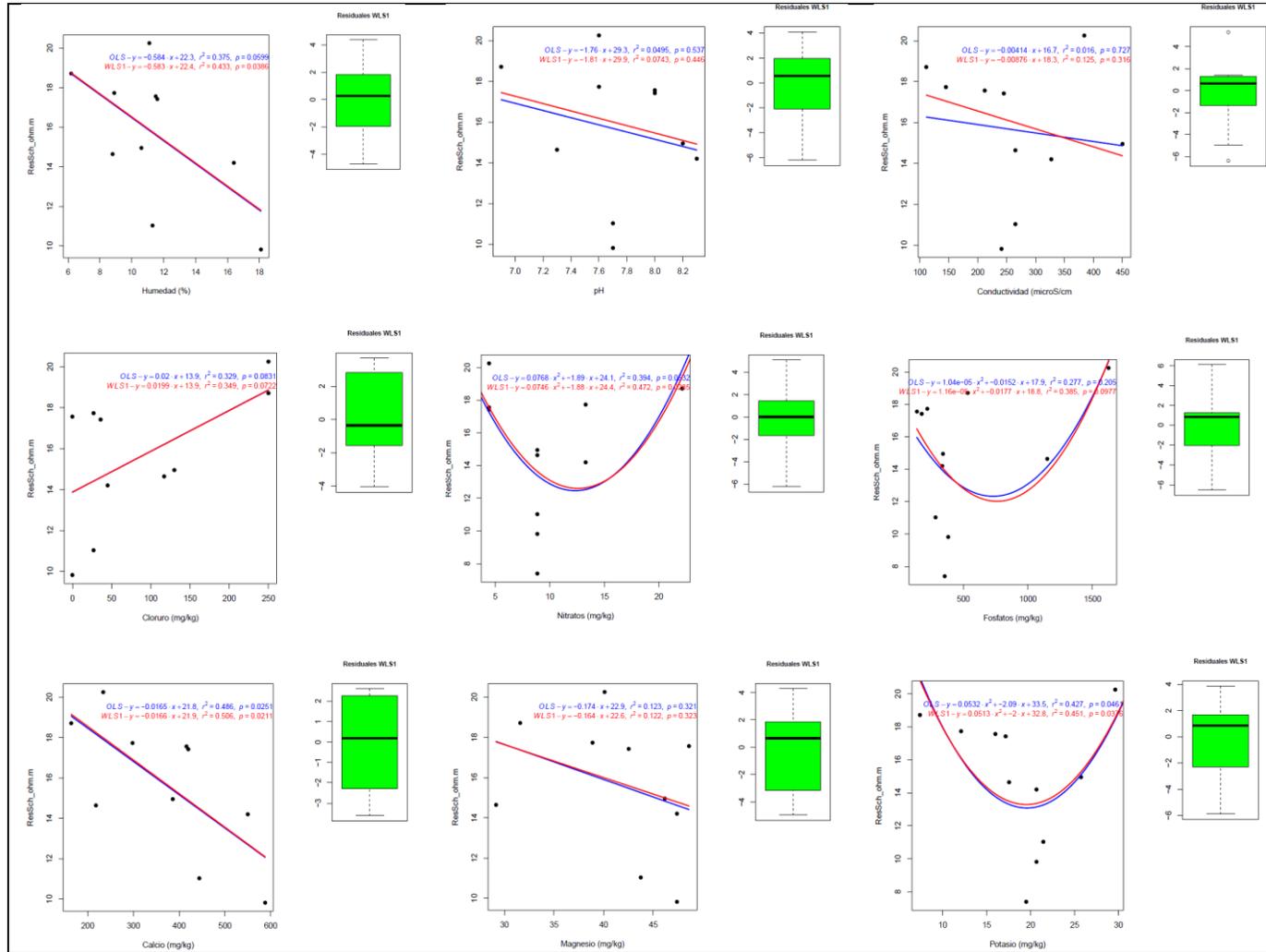


Figura 81: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad mediante arreglo Schlumberger. OLS (azul), WLS (rojo).

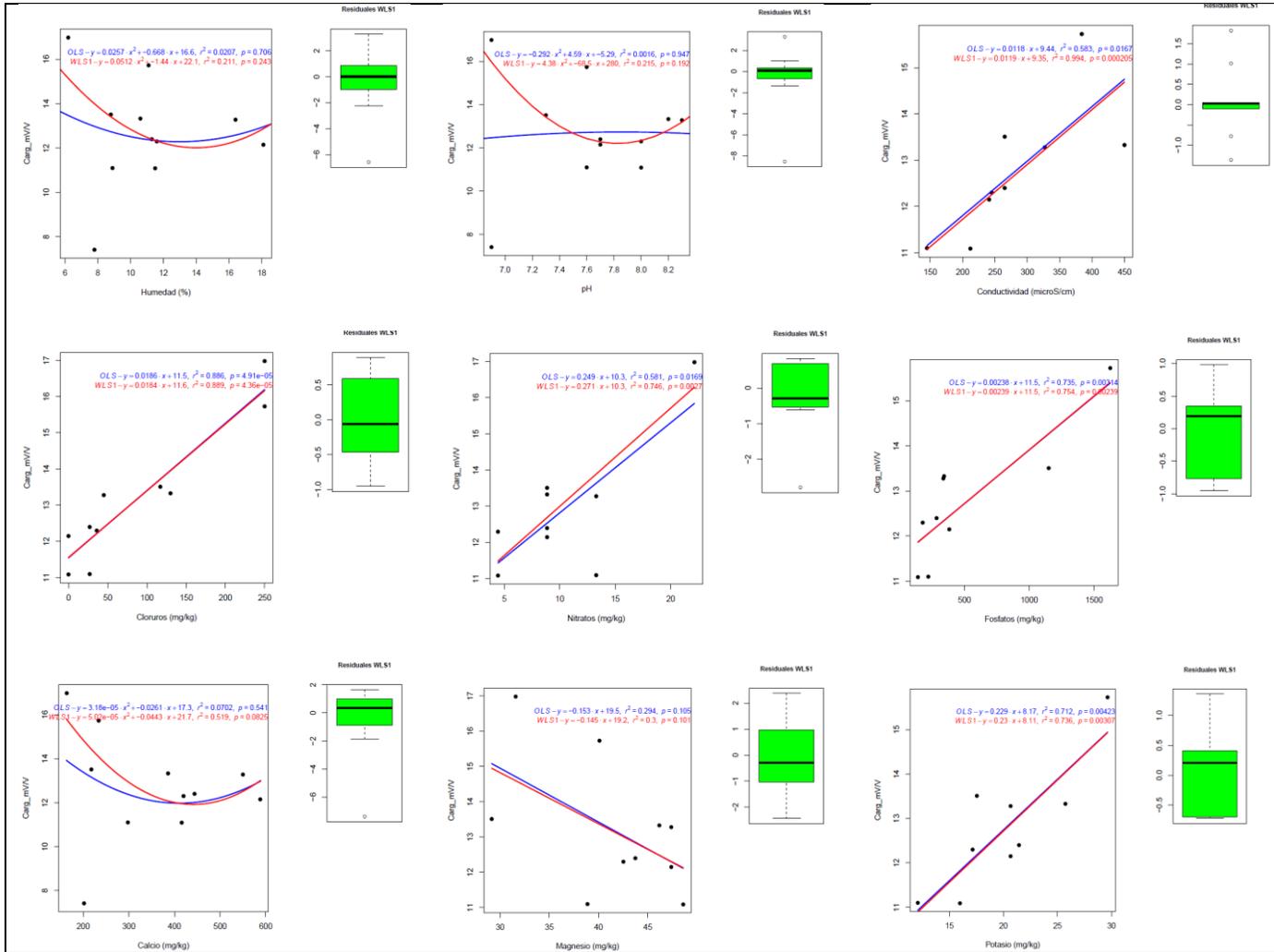


Figura 82: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y cargabilidad. Ajuste lineal ordinario (azul), Ajuste por pesos (rojo).

Tabla 22: Correlación Humedad y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coefficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r ²	0.433	0.441	0.00053	0.0389	0.4	0.211
p valor pendiente recta	0.0386	0.0362	0.949	0.585	0.0676	0.243

Tabla 23: Correlación pH y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coefficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r ²	0.0743	0.244	0.578	0.406	0.186	0.215
p valor pendiente recta	0.446	0.147	0.0107	0.0475	0.214	0.192

Tabla 24: Correlación Conductividad y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coefficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r ²	0.125	0.11	0.0466	0.239	0.0346	0.994
p valor pendiente recta	0.316	0.349	0.549	0.181	0.607	0.000205

Tabla 25: Correlación Cloruros y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coefficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r ²	0.349	0.216	0.00387	0.0894	0.517	0.889
p valor pendiente recta	0.0722	0.176	0.865	0.401	0.019	4.36x10 ⁻⁵

Tabla 26: Correlación Nitratos y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coefficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo

r^2	0.472	0.495	0.724	0.756	0.795	0.746
p valor pendiente recta	0.0285	0.0248	0.0168	0.0629	0.00148	0.0027

Tabla 27: Correlación Fosfatos y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r^2	0.385	0.248	0.124	0.389	0.547	0.754
p valor pendiente recta	0.0977	0.155	0.448	0.307	0.0182	0.00239

Tabla 28: Correlación Calcio y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r^2	0.506	0.433	0.0277	0.0128	0.432	0.519
p valor pendiente recta	0.0211	0.0387	0.646	0.756	0.0543	0.0825

Tabla 29: Correlación Magnesio y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r^2	0.122	0.0832	0.00892	0.0104	0.111	0.3
p valor pendiente recta	0.323	0.419	0.809	0.794	0.381	0.101

Tabla 30: Correlación Potasio y parámetros Geofísicos

	Resistividad					Cargabilidad
Coeficientes Correlación/ Arreglo Electrónico	Schlumberger	Wenner Schlumberger	Wenner Alpha	Wenner Beta	Dipolo Dipolo	Dipolo Dipolo
r^2	0.451	0.454	0.74	0.669	0.862	0.736
p valor pendiente recta	0.0376	0.0576	0.00722	0.0148	0.00204	0.00307

4.5 Discusión de resultados Sitio 1

Los resultados obtenidos de resistividad para el Sitio 1 presentan coherencia entre sí y en los puntos de intersección de los transectos. Los valores de resistividad obtenidos para los estratos superiores muestran consistencia respecto a los valores indicados en bibliografía (Reynolds, J. M. (1997); Orellana, E. 1972) para los sedimentos existentes en la zona que se caracterizan por ser sedimentos limos arcillosos de la Fm. Libertad. El aumento de resistividad observado en superficie es coherente con un menor grado de humedad y/o mayor grado de compactación del material debido al trabajo de maquinaria pesada o pisoteo de animales. Solo se observa una disminución de las resistividades en superficie en las zonas donde se encuentra el efluente vertido desde el aliviadero de las lagunas.

Respecto a las cargabilidades obtenidas, los bajos valores que se encuentran en el Sitio 1, son coherentes con lo establecido por Gazoty et al. (2012), donde plantean que las arcillas detectadas en superficie para un caso de estudio presentan cargabilidades cercanas a 10 mV/V. Sin embargo, en ese mismo estudio, zonas con arcillas se caracterizan por presentar una alta cargabilidad. Slater, L. D., & Lesmes, D. (2002) plantean que no existe una correlación directa entre el contenido de arcilla y la cargabilidad en ensayos de laboratorio realizados. Los mismos autores plantean que el máximo de respuesta de las arcillas a la cargabilidad también depende del tipo de arcillas presentes y que por lo tanto la respuesta de las arcillas a la cargabilidad puede ser muy variable. Esto puede explicar que en el Sitio 1, en zonas donde se podría definir como arcillas haya variaciones en las cargabilidades obtenidas.

En las zonas con presencia de efluentes en superficie y donde se realizaron los muestreos de suelo, se caracteriza por presentar una anomalía resistiva en superficie que se caracteriza por presentar valores de resistividad menor al resto de las zonas estudiadas. Esto es consistente con lo observado por Lossino et al. (2008); Sainato et al. (2011); Molina et al. (2014) para efluentes en establecimientos lecheros y Feedlots. En profundidad, se observa una tendencia similar. Respecto a la cargabilidad obtenida en estas zonas, se observan bajas cargabilidades aunque son similares a las de la zona en general. Sin embargo, en la zona de LG, se cree necesario realizar un muestreo a mayor profundidad para discernir entre la zona con alta y baja cargabilidad detectada. Las bajas cargabilidades observadas en superficie, en las zonas donde se encuentra el efluente parecen ser contradictorias con lo reportado en bibliografía respecto a la respuesta a sitios contaminados (Sogade et al., 2006; Leroux, 2007; Gazoty et al., 2012). Sin embargo, los contaminantes encontrados en este estudio presentan características diferentes a los encontrados en bibliografía. No se ha encontrado hasta el momento estudios realizados de IP para efluentes lecheros.

El muestreo de suelo realizado en LA indica que el suelo muestra mayor concentración de Nitratos, Calcio, Magnesio y Potasio respecto a LG. Esto se puede deber a que el efluente que se encuentra en LA presenta mayor concentración en todos los iones respecto a LG. El muestreo de suelo realizado en ambas lagunas muestra mayor concentración en todos los parámetros fisicoquímicos respecto al Sitio Blanco, excepto para el Carbono Orgánico y Fosfatos para la muestra de 1.5 m de profundidad. Sainato et al. (2011) y Molina (2014) plantean que los Nitratos y Fosfatos son indicadores de contaminación para efluentes lecheros en muestreos de suelo. Sin embargo, esos muestreos se realizaron a menos de 1 m de profundidad. Sainato et al. (2010) plantea que estos componentes se encuentran principalmente en el primer metro de suelo.

La composición iónica de la muestra de agua subterránea indica concentraciones de Nitratos y Potasio que podrían indicar contaminación por componentes orgánicos. Esto puede ser un indicador de la incidencia de las lagunas en el agua subterránea que se extrae aguas abajo de las mismas. Sin embargo, la imposibilidad de acceso al nivel freático en los sitios de muestreo debido a la profundidad a la que se encuentra el mismo y contar con una sola muestra de agua subterránea, no permite asegurar la incidencia directa del efluente vertido por las lagunas en el

agua subterránea. Otro aspecto a considerar es que la zona se caracteriza por ser una cuenca lechera y por consiguiente la aplicación de fertilizantes y abono orgánico pueden generar el aumento de estos componentes en el agua subterránea a nivel regional. Para determinar el grado de incidencia de cada componente en la calidad del agua subterránea bajo estas características, se requiere de un estudio más profundo respecto a la hidrogeología de la zona y fuentes de contaminación.

Se observa coherencia en el cambio de comportamiento existente a los 2 m de profundidad de algunos de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de suelo obtenidas en LA y LG respecto a lo obtenido en el levantamiento geofísico, principalmente para la resistividad, donde se observa una disminución de la resistividad a mayor profundidad. Esto podría indicar que existe un horizonte con menor permeabilidad debido al aumento del porcentaje de arcillas que se da a partir de los 2m de profundidad y que también genera menor resistividad. Es de destacar que este comportamiento diferencial se encuentra dentro de una misma formación geológica, la Fm. Libertad.

La correlación realizada entre los parámetros fisicoquímicos y los parámetros geofísicos como lo son la resistividad y cargabilidad, muestran que la resistividad presenta una correlación aceptable con el porcentaje de humedad del suelo, pH, Conductividad, Cloruros, Calcio, Magnesio, Fosfatos. En el caso de la cargabilidad, la correlación fue aceptable para el Calcio y Magnesio y Potasio. Estudios antecedentes (Sainato et al., 2011; Sainato et al., 2012; Molina et al., 2015), indican que la resistividad presenta una alta correlación con los Nitratos, Fosfatos, Sulfatos y Cloruros en zona no saturada para efluentes lecheros y feedlots. Es de destacar que la correlación en este estudio se basó en 13 datos experimentales, por lo que aumentar el volumen de información y datos fisicoquímicos de suelos podría aumentar la calidad de las correlaciones obtenidas.

En función de la correlación obtenida y si se consideran las mayores concentraciones de Magnesio y Calcio como indicadores de contaminación en el Sitio 1, se podría establecer que en un sitio con contaminación, la resistividad sería menor a 5 ohm.m y la cargabilidad sería mayor a 3 mV/V pero con cargabilidad baja. Esto indica que los iones presentes que presentan mayor correlación con la cargabilidad actúan como dieléctricos y se podrían generar polarización de membrana, aunque habría que profundizar en el estudio para asegurar esto. Si bien el Potasio, muestra una muy buena correlación con la cargabilidad ($r^2=0.99$) no se considera coherente la relación obtenida desde el punto de vista geofísico y que la relación está fuertemente incidida por un solo dato.

Por consiguiente, en función de los resultados geofísicos obtenidos y de los parámetros fisicoquímicos resultantes de las muestras colectadas, se puede definir que en el Sitio 1 existe contaminación por el vertido de efluente lechero desde las lagunas de almacenamiento. Los sitios que se pueden definir como sitios contaminados son la zona hasta la progresiva 39 m del transecto 4 y hasta la progresiva 32 m del transecto 6 de LA. En LG, se podría definir como zona contaminada por efluente lechero entre las progresivas 22 m y 34 m (E18) del transecto 6. En ambos sitios, la mayor contaminación se estaría dando hasta los 2 m de profundidad. Sin embargo, serían necesarios perforaciones de mayor profundidad para poder dilucidar las anomalías geofísicas que se observan en estos transectos a mayor profundidad.

En función de los resultados obtenidos para el Sitio 1, resulta de interés indicar con línea punteada con color rojo la zona de la progresiva 34 m del transecto 3 de LA por observarse una zona con características geofísicas similares a las observadas en las zonas consideradas con contaminación (Ver Figura 83 y Figura 84). Sin embargo, para corroborar la contaminación en este sitio, se debería realizar un muestreo de suelo sobre el talud, con los riesgos que conlleva desde el punto de vista constructivo.

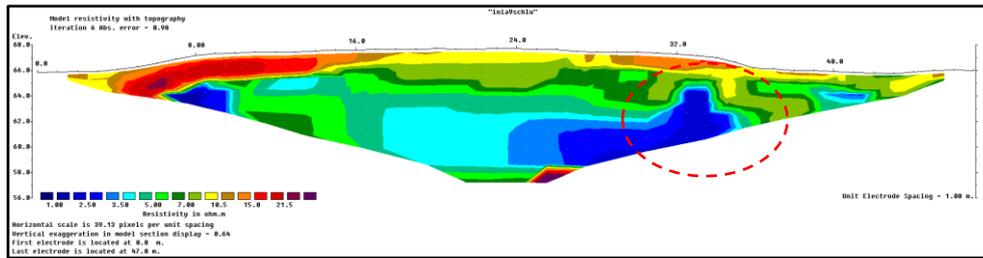


Figura 83: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 3 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.

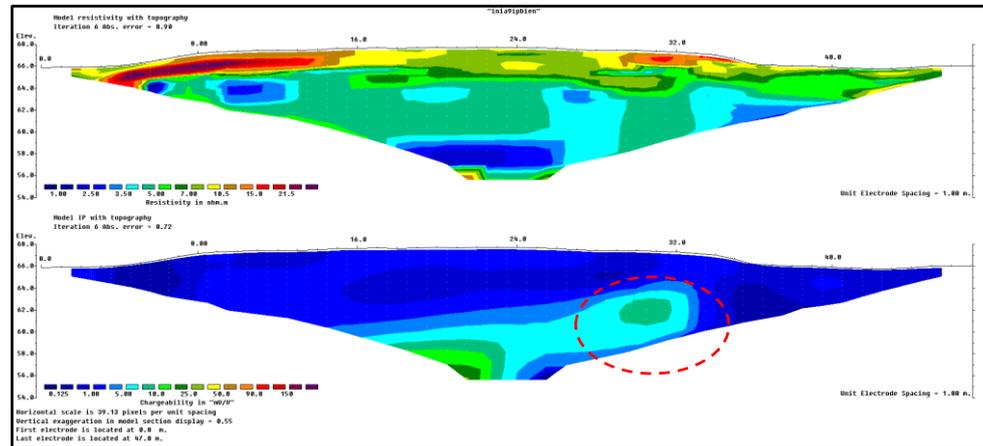


Figura 84: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 3 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo. Línea punteada de rojo indica anomalía geofísica de interés.

4.6 Discusión de resultados Sitio 2

Los resultados obtenidos de resistividad para el Sitio 2 presentan coherencia entre sí y en los puntos de intersección de los transectos. Los valores de resistividad obtenidos para los estratos superiores muestran consistencia respecto a los valores indicados en bibliografía (Reynolds, J. M. (1997); Orellana, E. 1972) para los sedimentos existentes en la zona que se caracterizan por ser sedimentos limos arcillosos de la Fm. Libertad hasta los 4 metros de profundidad y luego se encuentra la Fm. Raigón sin alcanzar el grado de saturación total. El descenso de resistividad observado en los transectos 3 y 4 en la cota 30 m.s.n.m es consistente con la cota del nivel freático observado en el pozo del establecimiento.

En el Sitio 2 se obtuvieron cargabilidades mayores respecto al Sitio 1 en términos generales, aunque también se observa la incidencia de la formación geológica en los resultados obtenidos.

En las zonas donde se realizaron los muestreos de suelo, se observa que en la zona de Lagunas la resistividad y la cargabilidad aumentan a partir de los 3-4 m de profundidad respecto a los estratos superiores. Para el caso del Sitio Blanco, se observa un estrato de mayor resistividad y cargabilidad entre los 2 y 4 m de profundidad. Según la descripción de la composición de las muestras colectadas, estas zonas se caracterizan por presentar mayor contenido de arenas respecto a los estratos superiores. Para el caso de la zona de Lagunas, si bien la resistividad aumenta respecto a los estratos superiores, es menor respecto al medio para esa profundidad.

El muestreo de suelo realizado en la zona de Lagunas indica que las muestras presentan un aumento considerable en la concentración de Nitratos, Cloruros y Fosfatos a partir de los 3 m de profundidad. Respecto al muestreo realizado en el Sitio Blanco, se observa un marcado aumento de la concentración de Cloruros, Conductividad Eléctrica y Fosfatos a los 2 m de profundidad para luego descender nuevamente. Esto indica que el Sitio Blanco podría presentar contaminación desde superficie producto de la actividad antrópica ya que ese potrero era antiguamente una zona donde los animales estaban durante la noche.

La composición iónica de las muestras de agua subterránea indica concentraciones de Cloruros, Nitratos, Sulfatos y Potasio que podrían indicar contaminación por componentes orgánicos. En particular, el Sitio 2, se caracteriza por presentar mayores concentraciones de estos iones respecto a una perforación cercana que capta de la misma formación geológica. Esto puede ser un indicador de la incidencia de las lagunas en el agua subterránea que se extrae en el sitio. La elevada concentración de estos iones en la perforación de brocal puede indicar la incidencia de las lagunas en la calidad del agua de esta perforación. A pesar que se encuentre aguas arriba de las lagunas, la escasa distancia a la zona de lagunas (menor a 50m) puede estar generando que al bombear dicha perforación se induzca un flujo desde las lagunas hacia la perforación o simplemente el hecho de que exista contaminación en todo el establecimiento.

La correlación realizada entre los parámetros fisicoquímicos y los parámetros geofísicos como lo son la resistividad y cargabilidad, muestran que la resistividad presenta una correlación aceptable con el Calcio y en menor medida con el Calcio, Nitratos, Potasio y porcentaje de humedad. En el caso de la cargabilidad, la correlación fue aceptable para la Conductividad Eléctrica, Cloruro, Potasio, Fosfatos, Nitratos y Calcio. Es de destacar que para el caso del Sitio 2, las características geológicas del suelo se modifican en profundidad producto del cambio de formación geológica a partir de los 3m aproximadamente y esto puede tener incidencia en los resultados obtenidos.

En función de la correlación obtenida, para el Sitio 2 la cargabilidad muestra mayor correlación respecto a los parámetros que podrían considerarse indicadores de contaminación respecto a la resistividad. En este Sitio, los iones como el Cloruro que presentan características conductoras podrían estar generando un proceso de polarización electrónica en la respuesta de la cargabilidad. Si se consideran las mayores concentraciones de Cloruros, Nitratos, Fosfatos y Potasio como indicadores de contaminación en el Sitio 2, se podría establecer que en un sitio con contaminación, la resistividad disminuye respecto al medio y la cargabilidad aumenta aunque siguen siendo cargabilidades medias.

Por consiguiente, se podría establecer que en el Sitio 2 la contaminación por efluentes lecheros desde las lagunas de almacenamiento, se encuentra entre las progresivas 30 m (E21) y 42 m (E29) del transecto 1 a partir de los 3 m de profundidad. Comportamiento similar en términos de la resistividad, aunque no confirmado por muestreos de suelos, se observa entre las progresivas 48 m y 62 m del transecto 3.

4.7 Comparación resultados sitios estudiados

Ambos sitios estudiados presentan algunas similitudes y diferencias entre sí. Desde el punto de vista geológico, en ambos sitios se encuentra en superficie una formación limo arcillosa como lo es la Fm. Libertad. Para el caso del Sitio 1, la Fm. Libertad tiene una potencia de aproximadamente 18 m en la zona estudiada. Subyacente a la Fm. Libertad se encuentran los granitos del Paleoproterozoico. En el Sitio 2, la Fm. Libertad tiene una potencia de 3 m a 5 m aproximadamente. Subyacente a esta formación, en el Sitio 2 se encuentra la Fm. Raigón que se caracteriza por ser una formación con alto contenido de arenas.

Respecto a las características de los efluentes de las lagunas. Se observan diferencias entre los sitios estudiados e inclusive en un mismo sitio (Ver Capítulo 4.3.1.2). Esto es consistente con lo que plantea INALE (2020) en el que existen diferencias en las características del efluente en función de la alimentación del ganado, manejo del rodeo y sistema de gestión del efluente previo a su almacenamiento en las lagunas. En este sentido, el Sitio 2 podría considerarse que el efluente muestreado de la laguna de almacenamiento tiene una concentración en los iones analizados en un punto medio respecto a las muestras analizadas del Sitio 1 a excepción del Fosfato y del Magnesio (Ver Figura A.83, Figura A.84 y Figura A.85 del Anexo 7.4). Esto se debe a que en el Sitio 1 la prensa extrusora previo a LG presenta una mayor eficiencia en la remoción

de sólidos del efluente respecto a LA. El sistema de gestión de efluentes en LA no cuenta con sistema de remoción de sólidos. En el caso del Sitio 2, tampoco se cuenta con un sistema de remoción de sólidos pero la primera laguna actuaría de sedimentador. La concentración de Carbono Orgánico en la Laguna 2 del Sitio 2 se encuentra por debajo de LA del Sitio 1. Esto se debe a que la Laguna 1 del Sitio 2 tiene características constructivas que favorecen los procesos anaeróbicos y disminuyen el contenido de materia orgánica.

Los análisis de suelos realizados en ambos sitios muestran que los sitios se caracterizan por contener limos y arcillas en superficie, aunque el contenido de arenas aumenta considerablemente en el Sitio 2 a partir de los 3 m de profundidad aproximadamente. Desde el punto de vista fisicoquímico de las muestras analizadas, el pH no mostró diferencias significativas entre ambos sitios. Las zonas de las Lagunas del Sitio 1 son las que presentan los mayores porcentajes de humedad desde superficie. Siendo consistente con la presencia del efluente en superficie en estos sitios. Esta misma zona del Sitio 1 y el Sitio Blanco del Sitio 2 son los puntos que presentan mayor concentración de Nitratos en superficie, siendo consistente con la presencia del efluente en superficie o de animales como es el caso del Sitio 2. En el Sitio 2, en la zona de Lagunas, los Nitratos presentan la mayor concentración en profundidad. Para el caso del Calcio, el comportamiento es muy similar en ambos sitios. El magnesio presenta mayores concentraciones en la zona de ambas lagunas del Sitio 1 respecto al resto de los sitios muestreados. El Fosfato presentó las mayores concentraciones en la zona del Sitio Blanco del Sitio 2 a los 2 m de profundidad y en la Zona de Lagunas tiene una tendencia a aumentar en profundidad aunque sin alcanzar la concentración del Sitio Blanco. Por último, para el caso del Cloruro, las zonas que presentan mayor concentración son ambas lagunas del Sitio 1 a 2 m de profundidad y a partir de los 3 m de profundidad de la Zona de Lagunas del Sitio 1.

El muestreo de agua subterránea de las perforaciones existentes en ambos sitios, muestra que los dos sitios presentan una elevada concentración de bicarbonatos producto del intercambio que puede existir con la formación sedimentaria que predomina en ambos sitios. Respecto a los Cloruros, Nitratos y Sulfatos, el Sitio 2 es el que presenta mayor concentración de estos iones en ambas perforaciones e inclusive mayor a una perforación cercana.

Los datos del levantamiento geofísico indican que el Sitio 1 se caracteriza por presentar resistividades menores a las resistividades relevadas en el Sitio 2. Las mayores diferencias se observan a partir de los 4 m de profundidad en la zona de Lagunas del Sitio 2, donde se obtuvieron los mayores valores de resistividad. Esto es consistente con los perfiles litológicos existentes en ambos sitios.

La cargabilidad muestra que el Sitio 1 también presenta menores valores en términos generales respecto al Sitio 2, aunque puntualmente existan zonas de cargabilidades medias en ambos sitios.

En la Tabla 31, se muestran las correlaciones establecidas entre los parámetros fisicoquímicos de las muestras de suelo analizadas y los valores de resistividad del arreglo Schlumberger y cargabilidad con Dipolo Dipolo con doble filtrado para ambos sitios. Se indica con color verde (coeficiente aceptable) los coeficientes mayores a 0.5 y con color naranja (coeficiente deficiente) los coeficientes menores a 0.5. Moriasi et al. (2007) establece como 0.5 un valor aceptable para modelos hidrológicos en donde el número de muestras generalmente es considerablemente mayor a los establecidos en este trabajo. Estos mismos autores plantean que este coeficiente es muy sensible a valores considerados outliers. Otro aspecto es que el coeficiente r^2 no indica si una correlación es aceptable o no pero en este caso se empleó como una referencia para realizar la discusión. En la sección 4.4 se analiza con mayor profundidad.

Tabla 31: Coeficientes de correlación de Pearson (r^2) entre parámetros fisicoquímicos de suelo y parámetros geofísicos en ambos sitios

	Resistividad		Cargabilidad	
	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 1	Sitio 2
Humedad (%)	0.75	0.43	0.35	0.21
pH	0.96	0.07	0.14	0.22
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0.60	0.13	0.14	0.99
Cloruro (mg/kg)	0.76	0.35	0.07	0.89
Nitrato (mg/kg)	0.02	0.47	0.21	0.75
Fosfato (mg/kg)	0.69	0.39	0.30	0.75
Calcio (mg/kg)	0.84	0.51	0.83	0.52
Magnesio (mg/kg)	0.80	0.12	0.82	0.30
Potasio (mg/kg)	0.36	0.45	0.99	0.74

Como se observa en la Tabla 31, la resistividad muestra una mejor correlación en el Sitio 1 respecto al Sitio 2. Las mejores correlaciones que se obtuvieron para la resistividad en ambos sitios en conjunto, fueron con el Calcio y la Humedad y en menor medida con los Cloruros, aunque en ambos casos para el Sitio 2 se encuentra por debajo de 0.5. El hecho de que en el Sitio 2, las correlaciones para la resistividad sean peores puede ser producto de la existencia de dos formaciones geológicas para la profundidad estudiada.

Para el caso de la cargabilidad, el comportamiento se invierte y es el Sitio 2 el que obtiene mejores resultados en la correlación. Por lo tanto, el hecho de la existencia de dos formaciones geológicas en el Sitio 2, probablemente tenga mayor incidencia en la resistividad respecto a la cargabilidad. Las mejores correlaciones se obtuvieron con la Conductividad Eléctrica, Cloruros, Nitratos, Fosfatos, Potasio y Calcio para el Sitio 2 y con el Calcio, Magnesio y Potasio para el Sitio 1. En este caso, el parámetro que presenta correlación aceptable en ambos sitios es el Calcio y el Potasio, aunque la relación establecida para el Potasio no resulta coherente desde el punto de vista geofísico. Es de destacar que las correlaciones establecidas entre el parámetro geofísico y el parámetro fisicoquímico no indican que esa sea la relación existente, sino que se buscó respetar las tendencias y aumentar los coeficientes de correlación. También se intentó establecer correlaciones con el logaritmo de los parámetros geofísicos ya que presentan distribución lognormal, pero no se obtuvieron mejores resultados.

Si se consideran las zonas con contaminación como se explicó en la sección 4.4, la respuesta geofísica en ambos sitios es una tendencia a la disminución de la resistividad y un aumento de la cargabilidad respecto al medio.

5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Para cumplir con el objetivo planteado se seleccionaron dos establecimientos lecheros de la zona de mayor densidad de ellos en Uruguay. Se realizaron mediciones geofísicas de resistividad y cargabilidad en el entorno de las lagunas de almacenamiento y en una zona alejada de las mismas denominada Sitio Blanco. Para llevar adelante el levantamiento geofísico, se realizaron transectos en los taludes de las lagunas y en el sentido del gradiente topográfico, para entender, en caso de existir contaminante, hacia dónde se desplazaría el contaminante. También se realizó un transecto en el Sitio Blanco. En cada transecto se emplearon los arreglos electródicos Wenner Alpha, Wenner Beta, Schlumberger, Wenner Schlumberger y Dipolo Dipolo, con el que también se midió cargabilidad.

En función de los resultados geofísicos y de la geología de cada sitio, se definieron zonas con anomalías geofísicas. En estas zonas de anomalía geofísica se realizaron muestreos de suelo hasta una profundidad variable en función de la anomalía de cada sitio y la que permitiera las herramientas de perforación disponibles. Se tomaron muestras cada 0.5m en el primer metro de suelo y luego cada 1 metro. A cada muestra de suelo se le realizó una caracterización granulométrica y caracterización fisicoquímica.

En cada establecimiento lechero también se colectaron muestras del efluente de la laguna y del agua subterránea de las perforaciones de abastecimiento, para conocer su composición fisicoquímica. Esto se realizó con el objetivo de establecer las características del efluente que podría estar contaminando el medio subterráneo y evaluar el tipo de posible contaminación del agua subterránea del sitio, producto de la actividad antrópica y fundamentalmente, debido a la infiltración desde las lagunas de almacenamiento.

A partir de los parámetros geofísicos de resistividad y cargabilidad obtenidos en el punto donde se realizaron las perforaciones y de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de suelo, se realizó una regresión lineal con ajuste por mínimos cuadrados. Debido a que pueden existir errores en el proceso de levantamiento de datos, se realizó una depuración de los datos para eliminar datos anómalos mediante la distancia de Cook y el test de Bonferroni. Se realizó la regresión lineal ordinaria simple y una regresión lineal pesada. La evaluación del modelo ajustado se realizó a partir del coeficiente de correlación de Pearson (r^2), del p valor de la recta de ajuste y del boxplot de los residuales del modelo pesado.

Con las actividades antes descritas, se pudieron obtener los primeros valores geofísicos de resistividad y cargabilidad asociados a zonas de lagunas de almacenamiento de efluente de establecimientos lecheros.

En función de las correlaciones obtenidas, se obtiene una mejor correlación de la resistividad en el Sitio 1 respecto del Sitio 2. Las mejores correlaciones que se obtuvieron para la resistividad, en ambos sitios en conjunto fueron con el Calcio y la Humedad y en menor medida con los Cloruros, aunque para el Sitio 2, en ambos casos se encuentra por debajo de 0.5. El hecho de que en el Sitio 2, las correlaciones para la resistividad sean menores puede ser debido a la existencia de dos formaciones geológicas diferentes a la profundidad estudiada.

Para el caso de la cargabilidad, el comportamiento se invierte y es el Sitio 2 en el que obtienen mejores resultados en la correlación. Por lo tanto, probablemente tenga mayor incidencia en la resistividad el cambio de la formación geológica. Las mejores correlaciones se obtuvieron con la Conductividad Eléctrica, Cloruros, Nitratos, Fosfatos, Potasio y Calcio para el Sitio 2 y con el Calcio, Magnesio y Potasio para el Sitio 1. En este caso, los parámetros que presentan una correlación aceptable en ambos sitios son las concentraciones del Calcio y del Potasio, aunque la relación establecida para el Potasio no resulta coherente desde el punto de vista geofísico.

Los parámetros fisicoquímicos que mayor correlación obtuvieron con los datos geofísicos fueron las concentraciones de Calcio, Magnesio, Potasio y Cloruros. Debido al carácter de ión conservativo del Cloruro, se propone la hipótesis que la respuesta geofísica puede provenir principalmente de la presencia de cloruros en el medio, producto de la contaminación por efluentes lecheros. Sin embargo, se necesita mayor número de pruebas y análisis bajo diferentes circunstancias para corroborar esta hipótesis.

Aún no es posible indicar la función que relaciona el parámetro geofísico de resistividad o cargabilidad con el parámetro fisicoquímico debido a que solo se cuenta con información de dos sitios y con pocas muestras para que tenga valor estadístico. Aunado a esto, existen diferencias desde el punto de vista geológico entre los sitios y del tipo de arcillas existentes, que pueden estar incidiendo en las relaciones obtenidas. En el Sitio 1, las arcillas se caracterizan por ser del tipo Illita y en el Sitio 2, son de la especie Caolinita. Esto se definió en función de la actividad de Skempton (1953). Otro aspecto que puede estar incidiendo en la respuesta geofísica y en las correlaciones obtenidas, es el hecho de que en el Sitio 1 la contaminación por efluente se da desde superficie por el vertido directo desde las lagunas y en el caso del Sitio 2, se da como producto de la infiltración. En el caso de LA del Sitio 1, existe una zona de anomalía geofísica que indicaría infiltración desde la laguna, pero el muestreo se debería realizar sobre el talud de la laguna con los riesgos constructivos que eso conlleva para la laguna.

Mediante las técnicas aplicadas, se pudo distinguir una respuesta geofísica relacionada con los sitios contaminados. Esta metodología permitió delinear y marcar las zonas contaminadas en las zonas aledañas a las lagunas de almacenamiento de efluentes lecheros.

En términos generales la respuesta geofísica en las zonas contaminadas en estos dos sitios fue la disminución de resistividad y aumento de cargabilidad respecto al medio. Es importante destacar que esta respuesta geofísica se establece en términos relativos y no absolutos, ya que la geología existente en el sitio incide en los resultados geofísicos obtenidos. Por este motivo, no es posible definir valores absolutos de resistividad y cargabilidad para la contaminación por efluentes lecheros independientemente de la zona de estudio.

La respuesta de cargabilidad en la polarización inducida fue observada en tiempos cortos. Esto muestra que los contaminantes existentes en estos sitios presentan características de respuesta en IP a elementos conductores.

Respecto a las características de los efluentes de las lagunas. Se observan diferencias entre los sitios estudiados e inclusive en un mismo sitio. Esto es consistente con lo que plantea INALE (2020) en el que existen diferencias en las características del efluente en función de la alimentación del ganado, manejo del rodeo y sistema de gestión del efluente previo a su almacenamiento en las lagunas. En este sentido, el Sitio 2 podría considerarse que el efluente muestreado de la laguna de almacenamiento tiene una concentración en los iones analizados en un punto medio respecto a las muestras analizadas del Sitio 1 a excepción del Fosfato y del Magnesio. Esto se debe a que en el Sitio 1 la prensa extrusora previo a LG presenta una mayor eficiencia en la remoción de sólidos del efluente respecto a LA. El sistema de gestión de efluentes en LA no cuenta con sistema de remoción de sólidos. En el caso del Sitio 2, tampoco se cuenta con un sistema de remoción de sólidos, pero la primera laguna actuaría de sedimentador.

El muestreo de agua subterránea de las perforaciones existentes en ambos sitios, muestra que los dos sitios presentan una elevada concentración de bicarbonatos producto del intercambio que puede existir con la formación sedimentaria que predomina en ambos sitios. Respecto a los Cloruros, Nitratos y Sulfatos, el Sitio 2 es el que presenta mayor concentración de estos iones en ambas perforaciones e inclusive mayor a una perforación cercana. Esto podría indicar la incidencia de las lagunas en el agua subterránea del sitio.

En función de los resultados geofísicos obtenidos y de los parámetros fisicoquímicos resultantes de las muestras colectadas, se puede definir que en el Sitio 1 existe contaminación por el vertido de efluente lechero desde las lagunas de almacenamiento. Los sitios que se pueden definir como sitios contaminados son la zona hasta la progresiva 39 m del transecto 4 y hasta la progresiva 32 m del transecto 6 de LA. En LG, se podría definir como zona contaminada por efluente lechero entre las progresivas 22 m y 34 m (E18) del transecto 6. En ambos sitios, la mayor contaminación se estaría dando hasta los 2 m de profundidad. Sin embargo, serían necesarias perforaciones de mayor profundidad para poder dilucidar las anomalías geofísicas que se observan en estos transectos a mayor profundidad.

En el Sitio 2, la contaminación por efluentes lecheros desde las lagunas de almacenamiento, se encuentra entre las progresivas 30 m (E21) y 42 m (E29) del transecto 1 a partir de los 3 m de profundidad. Un comportamiento similar, en términos de la resistividad, aunque no confirmado por muestreos de suelos, se observa entre las progresivas 48 m y 62 m del transecto 3.

5.2 Recomendaciones

Es necesario aumentar el número de sitios de estudio para contar con un rango más amplio de escenarios edafo-geológicos y constructivos de las lagunas de almacenamiento. Se recomienda que las perforaciones a realizar para la colecta de muestras de suelo para análisis fisicoquímico alcancen las anomalías detectadas. También se considera que se debe trabajar en mejorar el procedimiento de obtención de datos y su procesamiento.

Para ser más concluyentes respecto a la incidencia en el agua subterránea, de la infiltración de efluente desde las lagunas, se debería contar con una perforación que alcance el nivel freático aguas arriba de las lagunas. También sería necesario profundizar las perforaciones realizadas en las zonas aguas abajo de las lagunas, de modo de alcanzar el nivel freático para evaluar el movimiento de los contaminantes en todo el perfil.

Es recomendable hacer un estudio de ERT2D e IP2D donde el nivel estático se presente por arriba de las zonas de contaminación para corroborar su aplicabilidad bajo estas condiciones.

Un aspecto importante que considerar en los establecimientos lecheros como objetos de estudio, es la dificultad de contar con un Sitio Blanco como sitio de comparación y sin la afectación de esta actividad antrópica. Si bien existen sitios aguas arriba de las lagunas de almacenamiento de efluentes, resulta difícil encontrar sitios sin presencia de animales y por consiguiente sin presencia de los mismos contaminantes que se encuentran en las lagunas de almacenamiento.

6 Bibliografía

Al'pin L.M., Berdichevskii M.N., Vedrintsev G.A. and Zagarmistr A.M. (1966). Dipole Method for Measuring Earth Conductivity. Consultants Bureau, New York.

Auken E., Christiansen A. V., Jacobsen B. H., Foged N., & Sørensen K. I. (2005). Piecewise 1D laterally constrained inversion of resistivity data. *Geophysical Prospecting*, 53(4), 497-506.

Babiker I. S., Mohamed M. A., Terao H., Kato K., and Ohta K. (2004). Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system. *Environment International*, 29(8), 1009-1017.

Barker R.D. (1989). Depth of investigation of collinear symmetrical four electrode arrays. *Geophysics* 54, 1031-1037.

Binley A., & Kemna A. (2005). DC resistivity and induced polarization methods. In *Hydrogeophysics* (pp. 129-156). Springer, Dordrecht.

Brunet P., Clément R., and Bouvier C. (2010). Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT)—A case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology*, 380(1-2), 146-153.

Clément R., Descloitres M., Günther T., Oxarango L., Morra C., Laurent J. P., and Gourc J. P. (2010). Improvement of electrical resistivity tomography for leachate injection monitoring. *Waste Management*, 30(3), 452-464.

Cole K. S. and Cole R. H. (1941). Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics. *The Journal of chemical physics*, 9(4), 341-351.

Constable S.C., Parker R.L. and Constable C.G., (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52, 289-300.

Custodio E., y Llamas M. R. (2001). Hidrología subterránea. Barcelona, España. *Omega*, 1, 1157.

Cook R. D. (1977). Detection of influential observation in linear regression. *Technometrics*, 19(1), 15-18.

Dahlin T. and Zhou B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 52, 379-398

Dahlin T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27(9), 1019-1029.

Dahlin T., & Zhou B. (2006). Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, 4(2), 113-123.

Davis S. N., & De Wiest R. J. (1966). *Hydrogeology* (Vol. 463). New York: Wiley.

Degueurce A., Clément R., Moreau S., & Peu P. (2016). On the value of electrical resistivity tomography for monitoring leachate injection in solid state anaerobic digestion plants at farm scale. *Waste Management*, 56, 125-136.

Depountis N., Harris C., Davies M. C., Koukis G., and Sabatakakis N. (2005). Application of electrical imaging to leachate plume evolution studies under in-situ and model conditions. *Environmental Geology*, 47(7), 907-914.

Dey A., and Morrison H. F. (1979a). Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical prospecting*, 27(1), 106-136.

Dey A., and Morrison H. F. (1979b). Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. *Geophysics*, 44(4), 753-780.

DIEA. (2018). Dirección de Estadísticas Agropecuarias. Anuario Estadístico Agropecuario. <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/publicaciones/anuarios-diea>

DINAMIGE. Dirección Nacional de Minería y Geología. http://visualizadorgeominero.dinamige.gub.uy/DINAMIGE_mvc2/. Escala 1:500000. Consultado 30/03/2020.

Edwards L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. *Geophysics* 42, 1020-1036.

Ellis R.G. and Oldenburg, D.W., (1994a), Applied geophysical inversion: *Geophysical Journal International*, **116**, 5-11.

Evjen H.M. (1938), Depth factor and resolving power of electrical measurements. *Geophysics* 3, 78-85.

Fattorelli S., and Fernández P. C. (2007). *Diseño hidrológico*. Zeta Editores.

Gazoty A., Fiandaca G., Auken E., & Christiansen A. V. (2012). Application of time domain induced polarization to the mapping of lithotypes in a landfill site. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(6), 1793.

Geoambiente (2018). Informe técnico de perforación de abastecimiento de agua subterránea de INIA La Estanzuela.

Giménez M., Menta A., Flaquer A., Musso M., y Ramos J. APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS AL ESTUDIO DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO LIBERTAD RAIGÓN.

Griffiths D.H. and Barker R.D., (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, **29**, 211-226.

Hallof P.G. (1957). On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.

Helsel D. R., and Hirsch R. M. (2002). Chapter A3: Statistical methods in water resources. *Techniques of water-resources investigations of the United States Geologic Survey: Book, 4*.

Hernández A., Verdier L., Portillo I., Benítez A., Emmer V., Benzano F., González M. J. (2019). Evaluación operativa de equipos separadores de sólidos para efluentes de establecimientos lechero. (en línea). In: Taller de Actualización en Gestión Ambiental y Manejo Agronómico de Efluentes de Tambos (2019, Montevideo, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, s.e. s.p. Consultado feb. 2020.

Inale. (2014). Instituto Nacional de la Leche. Encuesta lechera 2014. <http://www.inale.org/innovaportal/file/4086/1/encuesta-lechera-2014--presentacion-resultados-preliminares-foro-a.pdf>.

Inale (2020). Instituto Nacional de la Leche. Efluentes de Tambos en Uruguay. Antecedentes bibliográficos nacionales e información generada en Uruguay.

Inman J. R. (1975). Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40(5), 798-817.

- Kemna A., Binley A., Cassiani G., Niederleithinger E., Revil A., Slater L., and Kruschwitz, S. (2012). An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 453-468.
- Leroux V., Dahlin T., and Svensson M. (2007). Dense resistivity and induced polarization profiling for a landfill restoration project at Härlöv, Southern Sweden. *Waste Management & Research*, 25(1), 49-60.
- Loke M.H. (2010). 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Tutorial, <http://www.geotomosoft.com/>.
- Loke, M. H. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- Loke M.H. and 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., & Barker R. D. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60(6), 1682-1690.
- López González A. E. (2014). Fuentes Enfocadas en la polarización inducida y resistividad eléctrica aplicadas en la localización de acumulación de metales, en una parcela de cultivo en el Valle del Mezquital. Tesis de Maestría. UNAM.
- Losinno B. N., Sainato C. M., Malleville H. J., y Galindo G. (2008). Tomografía de resistividad eléctrica aplicada a la caracterización de sitios contaminados en tambos. *Ciencia del suelo*, 26(2), 141-152.
- Luo Y., and Zhang G. (1998). *Theory and application of spectral induced polarization* (No. 8). SEG Books.
- Madden T. R., and Cantwell T. (1967). Part D: Induced polarization. A review. *Mining geophysics*, 2, 373-400.
- Massuel S., Favreau G., Descloitres M., Le Troquer Y., Albouy Y., and Cappelaere B. (2006). Deep infiltration through a sandy alluvial fan in semiarid Niger inferred from electrical conductivity survey, vadose zone chemistry and hydrological modelling. *Catena*, 67(2), 105-118.
- McGillivray P. R., and Oldenburg D. W. (1990). METHODS FOR CALCULATING FRÉCHET DERIVATIVES AND SENSITIVITIES FOR THE NON-LINEAR INVERSE PROBLEM: A COMPARATIVE STUDY 1. *Geophysical prospecting*, 38(5), 499-524.
- MGAP (1996) Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. "Carta de suelos digital a escala 1/200.000 del departamento de Colonia". Montevideo.
- MGAP <http://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/dgrn/#>. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca Carta de reconocimiento de suelos escala 1:40.000. Consultado el 15/01/2021.
- Molina J. M., Sainato C. M., Urricariet A. S., Losinno B. N., and Heredia O. S. (2014). Bulk electrical conductivity as an indicator of spatial distribution of nitrogen and phosphorous at feedlots. *Journal of Applied Geophysics*, 111, 156-172.
- Molina J. M., Urricariet A. S., Sainato C. M., Losinno B. N., & Heredia O. S. (2015). Effects of feedlot manure on soil and groundwater assessed with electrical resistivity tomography. *Environmental Earth Sciences*, 73(4), 1459-1472.
- Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner R. L., Harmel R. D., and Veith T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

- Mosteller F., and Tukey J. W. (1977). *Data analysis and regression: a second course in statistics*.
- Niaounakis M., and Halvadakis C. P. (2006). Olive processing waste management: literature review and patent survey (Vol. 5). Elsevier.
- Oldenburg D. W., and Li Y. (1994). Inversion of induced polarization data. *Geophysics*, 59(9), 1327-1341.
- Orellana E. (1972). *Prospección geoelectrica en corriente continua*, Paraninfo, Madrid, ISBN: 84-283-1153-6.
- Pelton W. H., Ward S. H., Hallof P. G., Sill W. R., and Nelson P. H. (1978). Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43(3), 588-609.
- Piper A.M. (1953) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. USGS, Washington.
- Preciozzi F., Spoturno J., Heinzen W., and Rossi P. (1985). Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a la escala 1: 500.000. DINAMIGE, Dirección Nacional de Minería y Geología. Montevideo, 91.
- Reynolds J. M. (1997). An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons.
- Roy A. and Apparao A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics* 36, 943-959.
- Sainato C. M., Losinno B. N., and Malleville H. J. (2010). Electrical resistivity tomography applied to detect contamination on a dairy farm in the Pampean region, Argentina. *Near Surface Geophysics*, 8(2), 163-172.
- Sainato C. M., Losinno B. N., and Malleville H. J. (2011). Assessment of contamination by intensive cattle activity through electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 76, 82-91.
- Sainato C., Galindo G., Malleville H., and Herrero M. A. (2006). Diagnóstico de la contaminación en suelo y agua subterránea por actividad ganadera mediante sondeos geoelectricos en la microcuenca del Arroyo Cañete (Pcia. De Buenos Aires). *Rev. Facultad de Agronomía UBA*, 26 (1), 73-82.
- Sanchez Miro J. J., and Pena Gutierrez J. (1991). Ajustar. A interactive processor for to fit, by means of least squares, one variable polynomials (arbitrary degree) at experimental points (No. CIEMAT--670). Centro de Investigaciones Energeticas Medioambientales y Tecnologicas (CIEMAT).
- Schoeller H. (1962) *Les eaux souterraines*. Massio et Cie, Paris, France
- Schön J. H. (1996). *Handbook of Geophysical Exploration: Fundamentals and Principles of Petrophysics. Seismic Exploration. Physical Properties of Rocks*. Pergamon.
- Seigel H. O. (1959). Mathematical formulation and type curves for induced polarization. *Geophysics*, 24(3), 547-565.
- Seigel H. O., Vanhala H., and Sheard, S. N. (1997). Some case histories of source discrimination using time-domain spectral IP. *Geophysics*, 62(5), 1394-1408.
- Sheriff R. E. (2002). *Encyclopedic dictionary of applied geophysics* (Vol. 13). SEG Books.

- Silvester P.P. and Ferrari R.L., (1990). Finite elements for electrical engineers (2nd. ed.). Cambridge University Press.
- Simyrdanis K., Papadopoulos N., Soupios P., Kirkou S., and Tsourlos P. (2018). Characterization and monitoring of subsurface contamination from Olive Oil Mills' waste waters using Electrical Resistivity Tomography. *Science of The Total Environment*, 637, 991-1003.
- Skempton A. W, (1953). The colloidal activity of clays. *Selected papers on soil mechanics*, 106-118.
- Slater L. D., and Lesmes D. (2002). IP interpretation in environmental investigations. *Geophysics*, 67(1), 77-88.
- Sogade J. A., Scira-Scappuzzo F., Vichabian Y., Shi W., Rodi W., Lesmes D. P., and Morgan F. D. (2006). Induced-polarization detection and mapping of contaminant plumes. *Geophysics*, 71(3), B75-B84.
- Stigler S. M. (1986). The history of statistics: The measurement of uncertainty before 1900. Harvard University Press.
- Taverna M. A., Garcia K. E., and Adorni M. B. (2014). Procedimiento de muestreo de efluentes líquidos y residuos sólidos orgánicos generados en el tambo. 1ª ed.-Rafaela, Santa Fe: Ediciones INTA, 2014. ISBN 978-987-521-514-6.
- Techera J., Arriguetti and Spoturno, J. (2004). Mapa geológico y de recursos minerales del departamento de San José a escala 1/100.000, Memoria Explicativa, Parte III Recursos minerales. *Proyecto CONICYT*, 6019.
- Tejero R., Gómez-Ortiz D., Heydt G. G., Toledo F. M., Martínez C. M. C., Rodriguez M. D. M. S., and Suarez J. J. Q. (2017). Electrical resistivity imaging of the shallow structures of an intraplate basin: the Guadiana Basin (SW Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 139, 54-64.
- Tejero-Andrade A., Argote-Espino D. L., Cifuentes-Nava G., Hernández-Quintero E., Chávez R. E., and García-Serrano, A. (2018). 'Illuminating' the interior of Kukulcan's Pyramid, Chichén Itzá, Mexico, by means of a non-conventional ERT geophysical survey. *Journal of Archaeological Science*, 90, 1-11.
- Tejero-Andrade A., Cifuentes G., Chávez R. E., López-González A. E., and Delgado-Solórzano, C. (2015). L-and CORNER-arrays for 3D electric resistivity tomography: an alternative for geophysical surveys in urban zones. *Near Surface Geophysics*, 13(4), 355-368.
- Vanhala H. (1997). Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization (SIP) method. *Geophysical prospecting*, 45(2), 303-326.
- Ward S. H., Sternberg, B. K., LaBrecque, D. J., and Poulton, M. M. (1995). Recommendations for IP research. *The Leading Edge*, 14(4), 243-247.
- Wolberg J. (2006). Data analysis using the method of least squares: extracting the most information from experiments. Springer Science & Business Media.
- Wolberg J. R. (1967). Prediction Analysis, D. VanNostrand Co. Inc., Princeton, NJ.
- Wong J. (1979). An electrochemical model of the induced-polarization phenomenon in disseminated sulfide ores. *Geophysics*, 44(7), 1245-1265.
- Zorn M. E., Gibbons, R. D., & Sonzogni, W. C. (1997). Weighted least-squares approach to calculating limits of detection and quantification by modeling variability as a function of concentration. *Analytical Chemistry*, 69(15), 3069-3075.

7 Anexo

7.1 Perfiles de resistividad y cargabilidad

En este Anexo se incluyen los perfiles de ERT2D e IP2D obtenidos en el sitio 1 (Anexo 7.1.1) y sitio 2 (Anexo 7.1.2) que no fueron incluidos en el cuerpo del texto.

7.1.1 Sitio 1

7.1.1.1 LA

Perfil 1

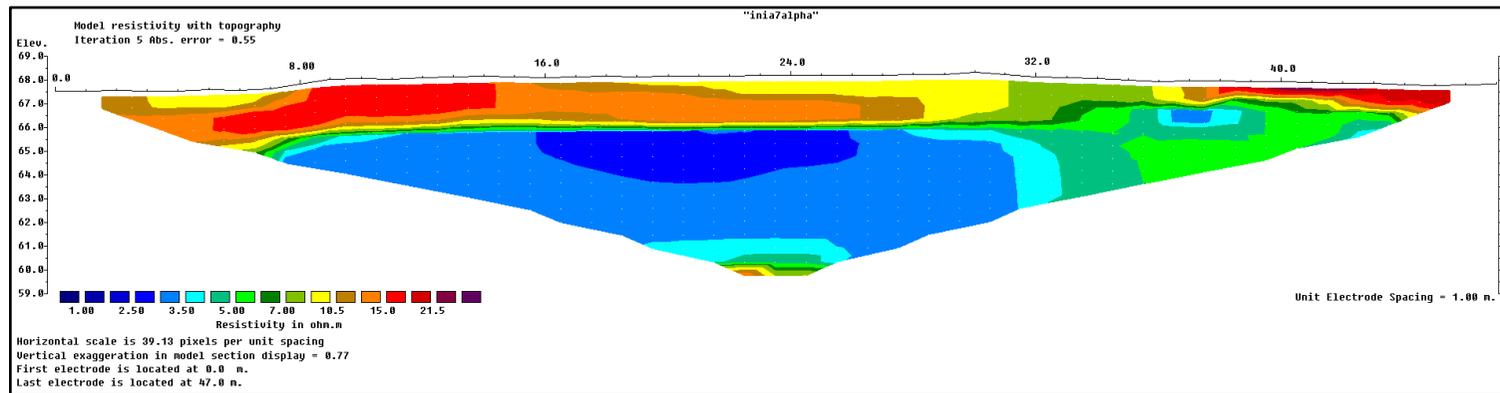


Figura A. 1: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

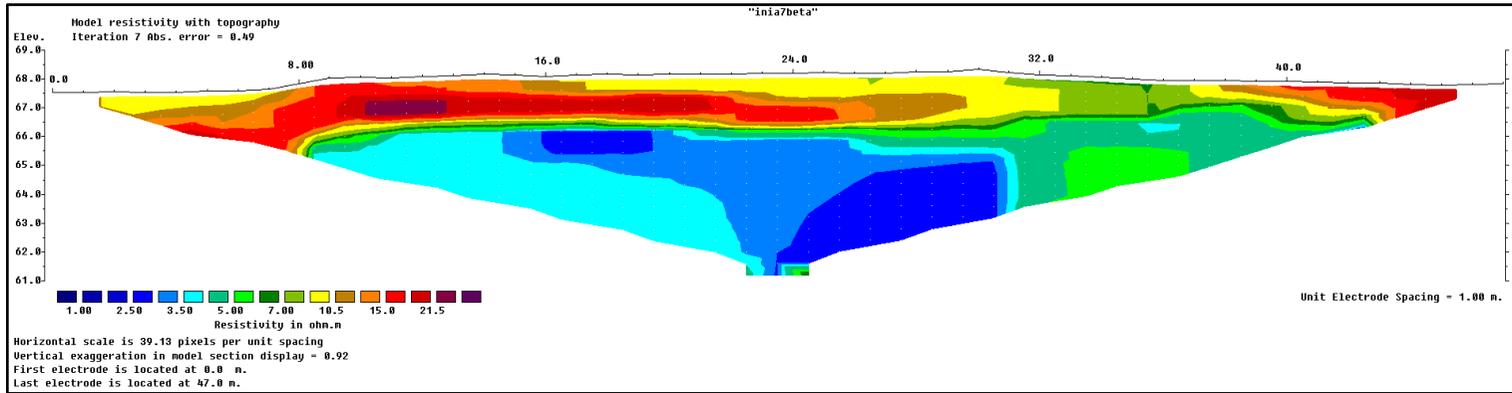


Figura A. 2: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

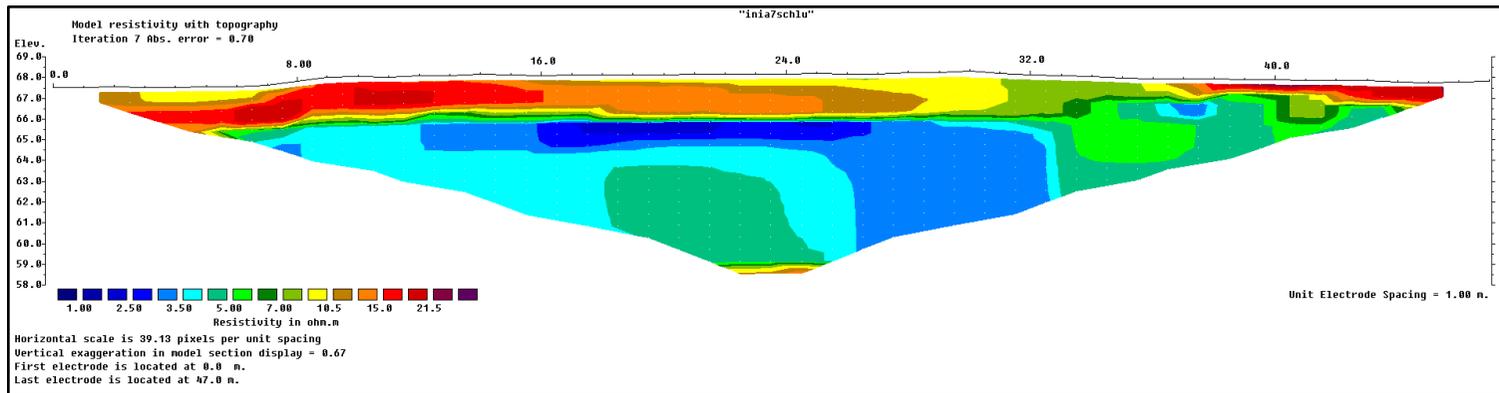


Figura A. 3: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.

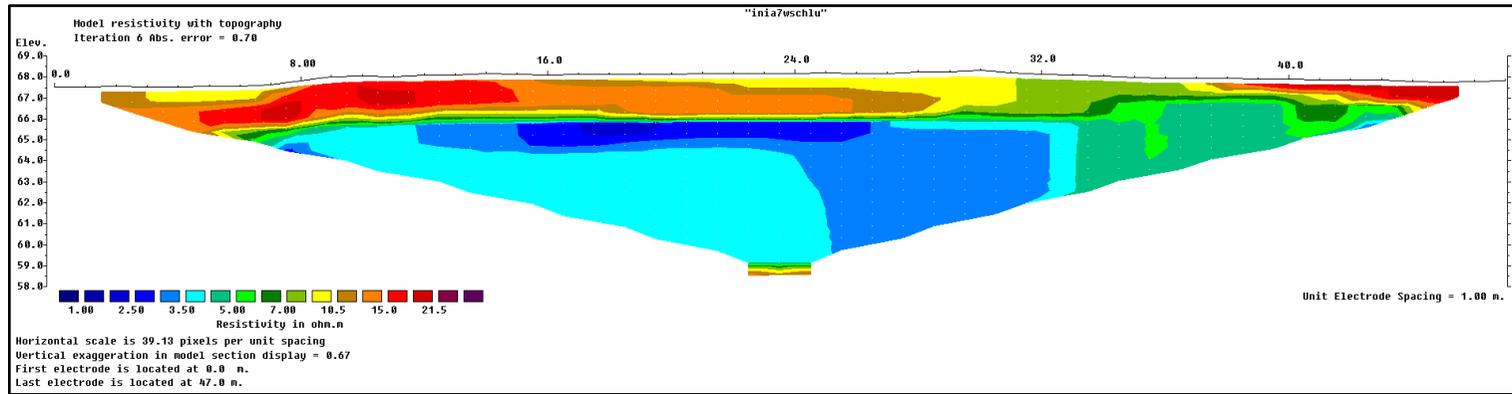


Figura A. 4: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

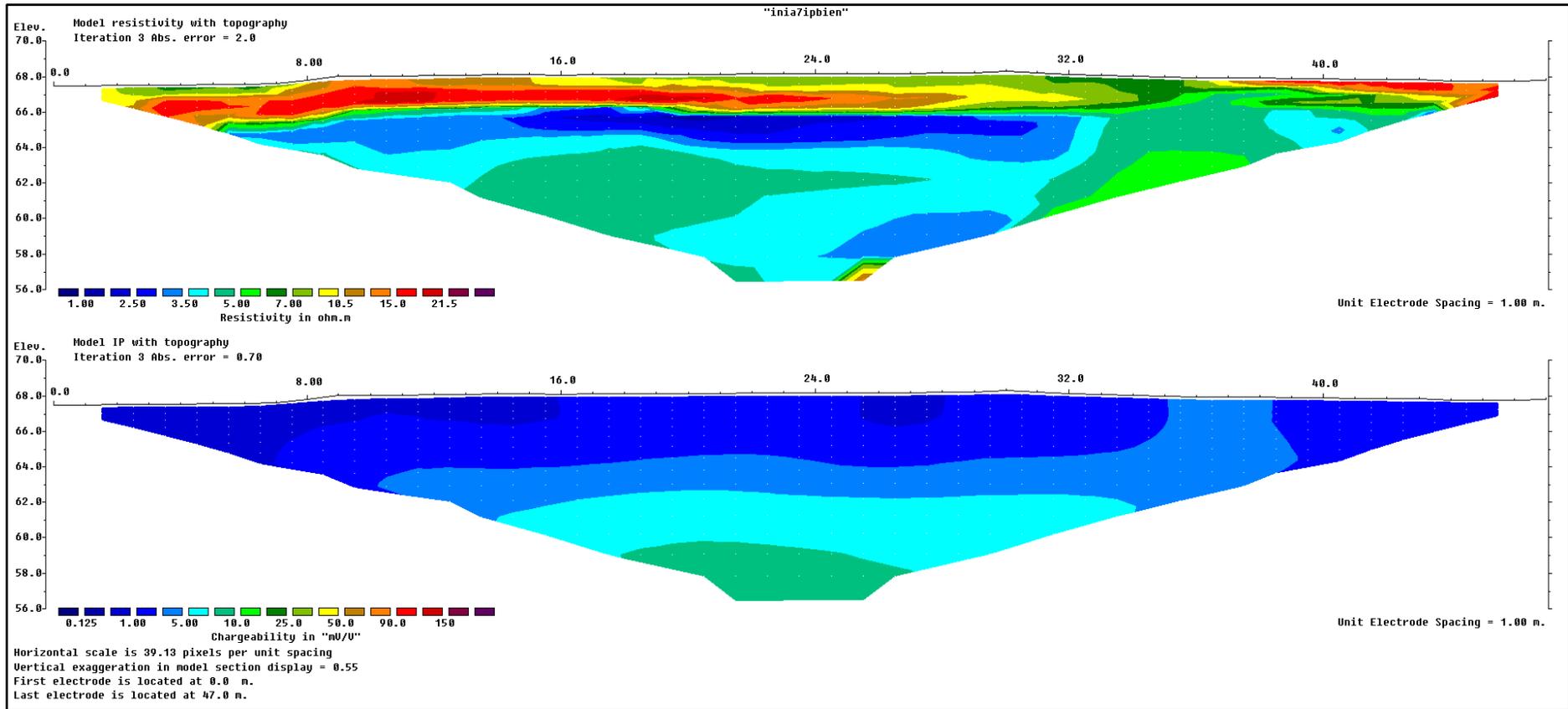


Figura A. 5: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 1 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

Perfil 2

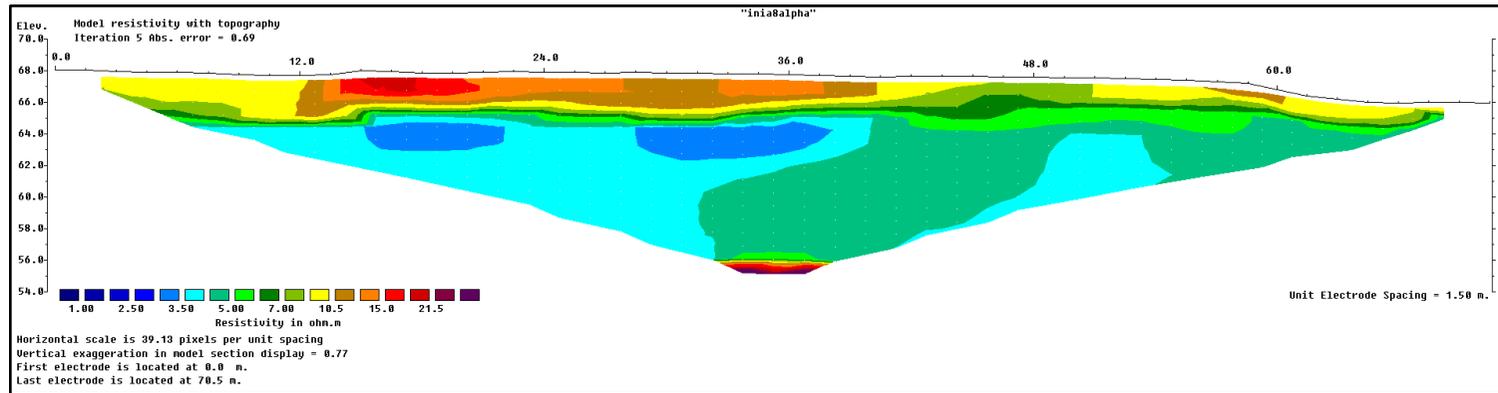


Figura A. 6: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 2 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

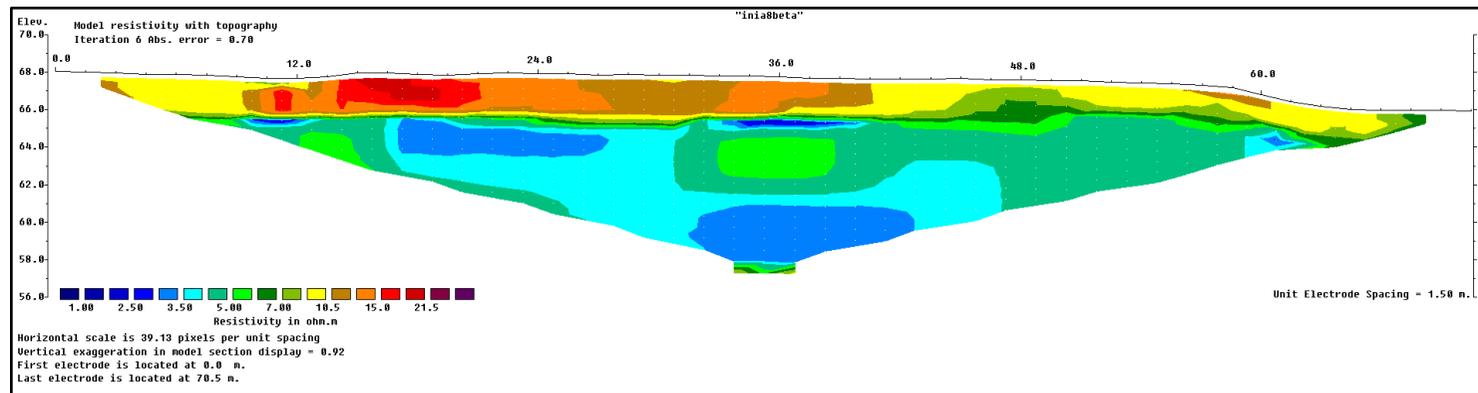


Figura A. 7: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 2 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

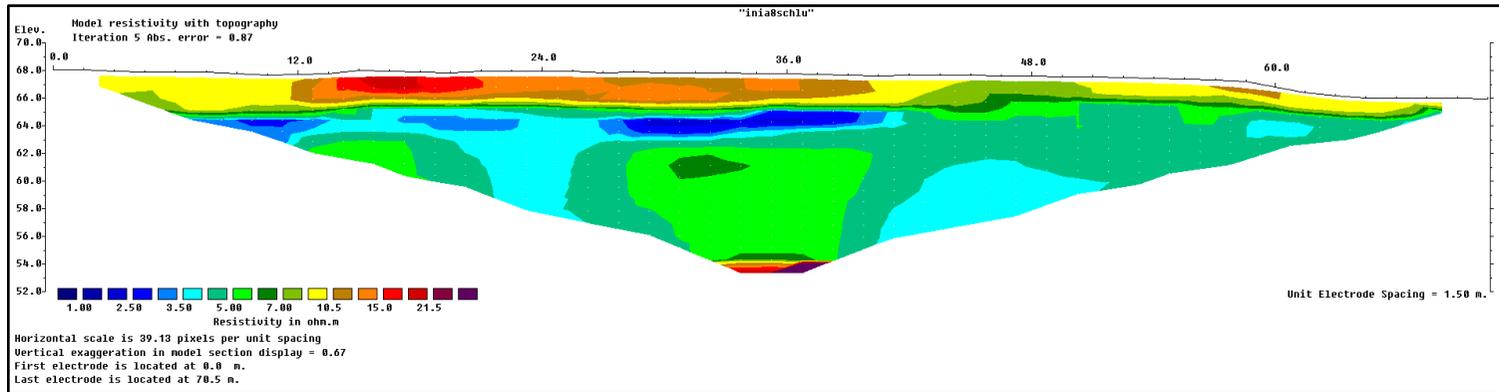


Figura A. 8: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 2 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.

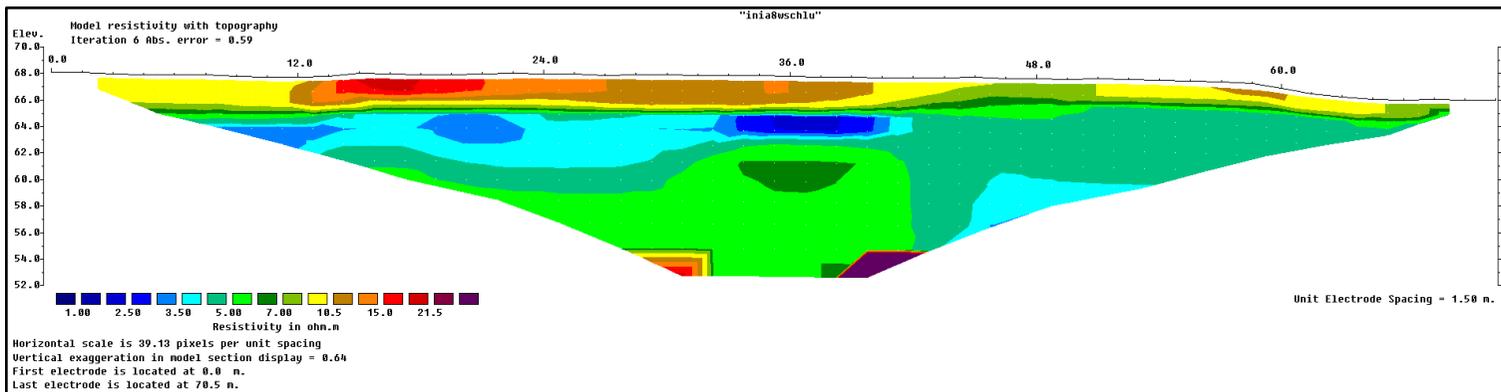


Figura A. 9: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 2 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger

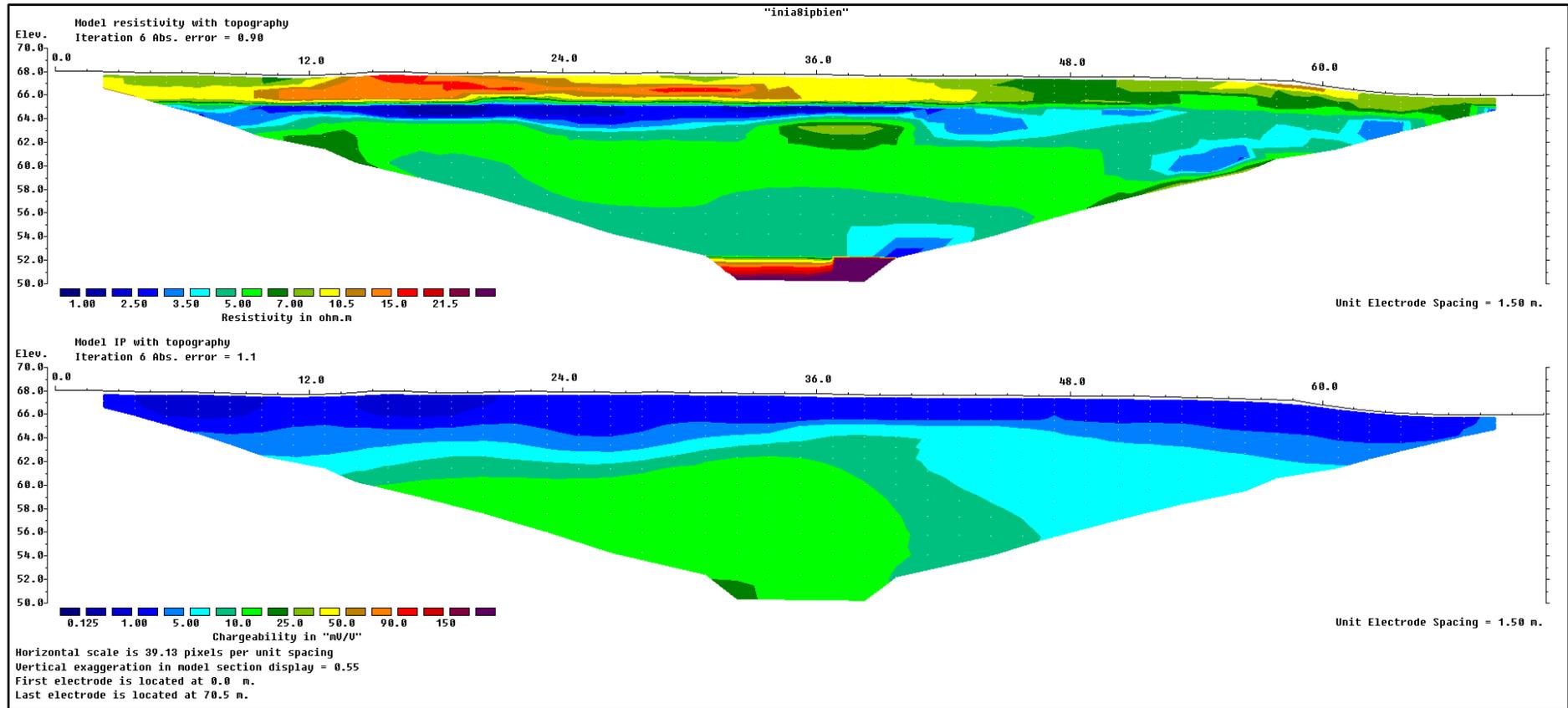


Figura A. 10: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 2 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

Perfil 3

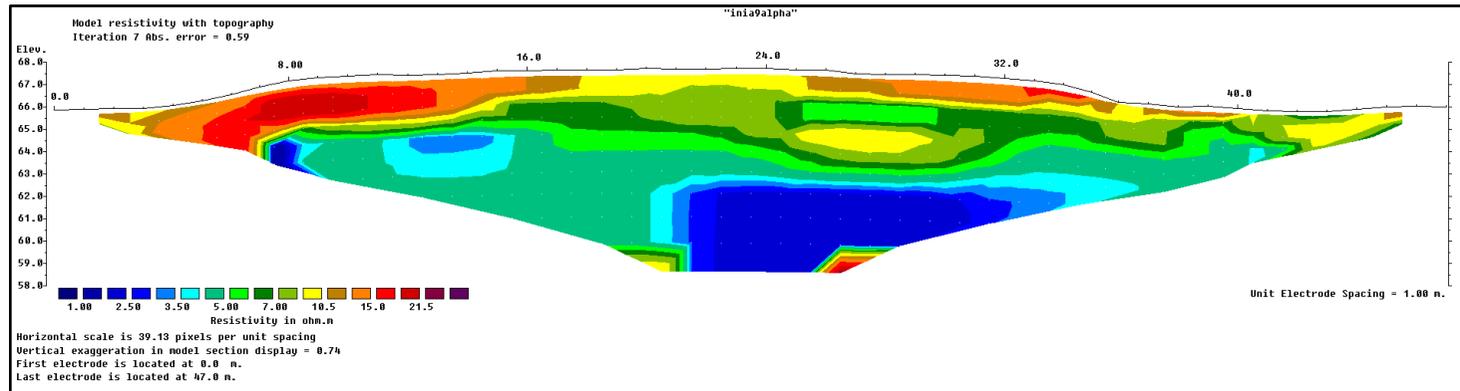


Figura A. 11: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 3 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

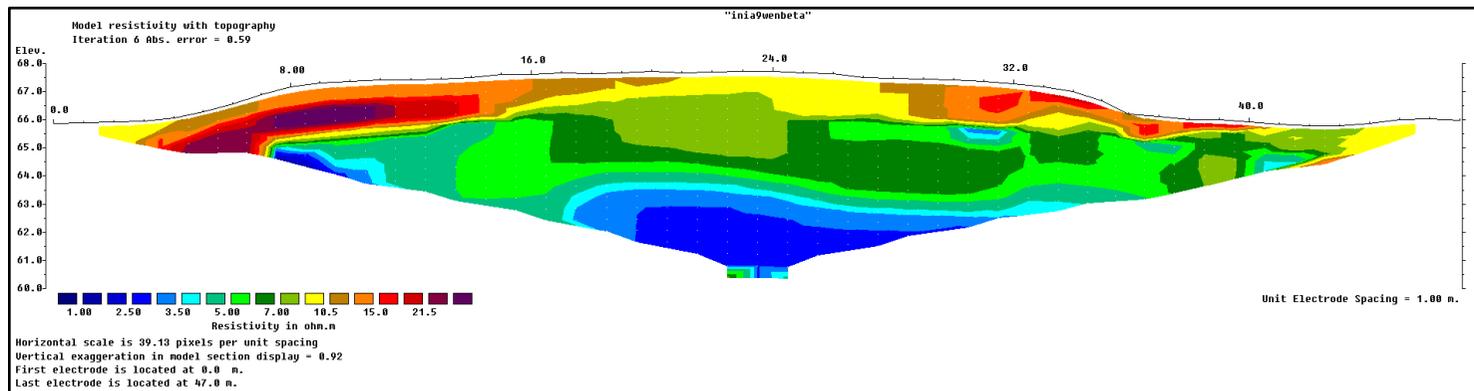


Figura A. 12: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 3 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

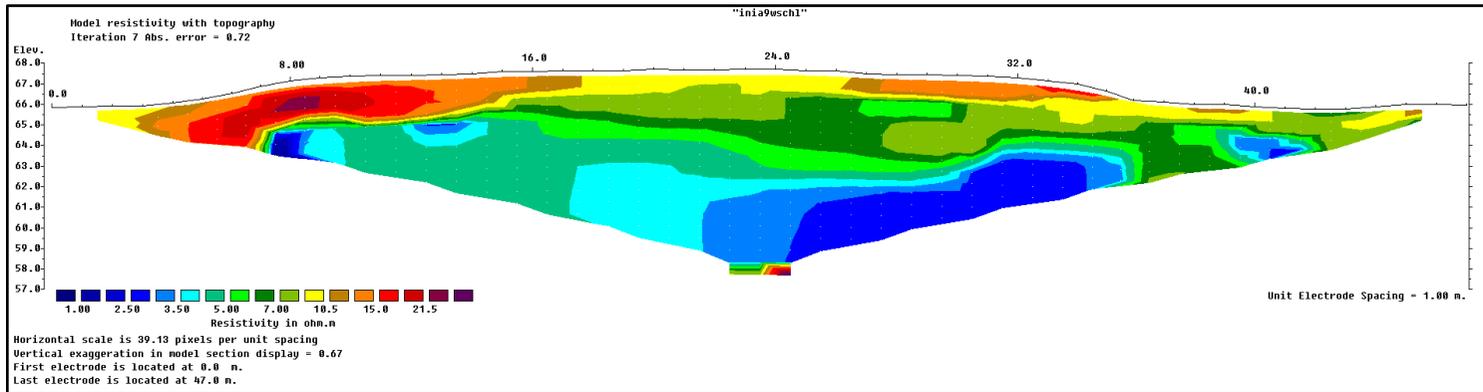


Figura A. 13: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 3 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

Perfil 4

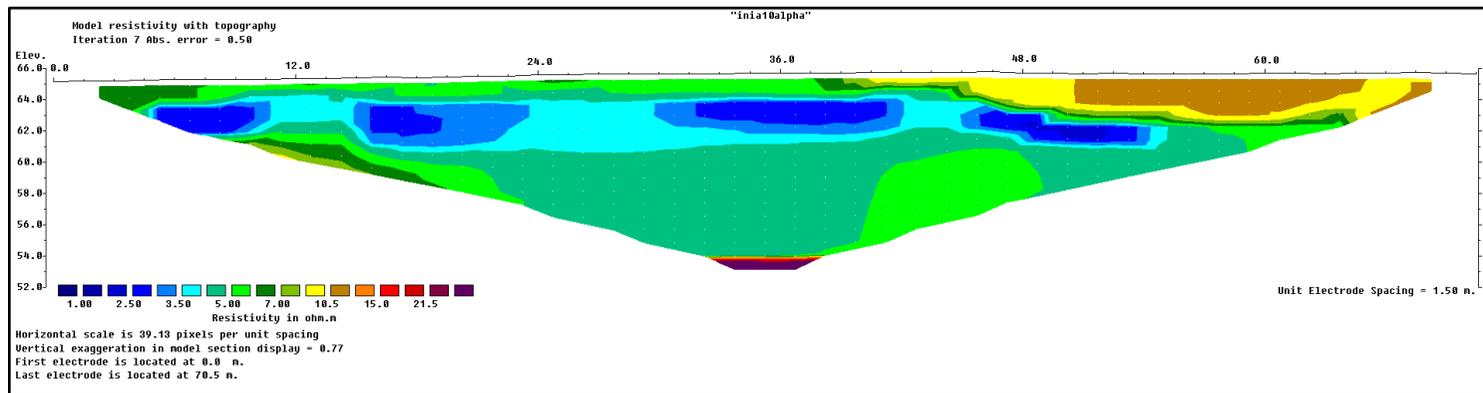


Figura A. 14: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 4 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

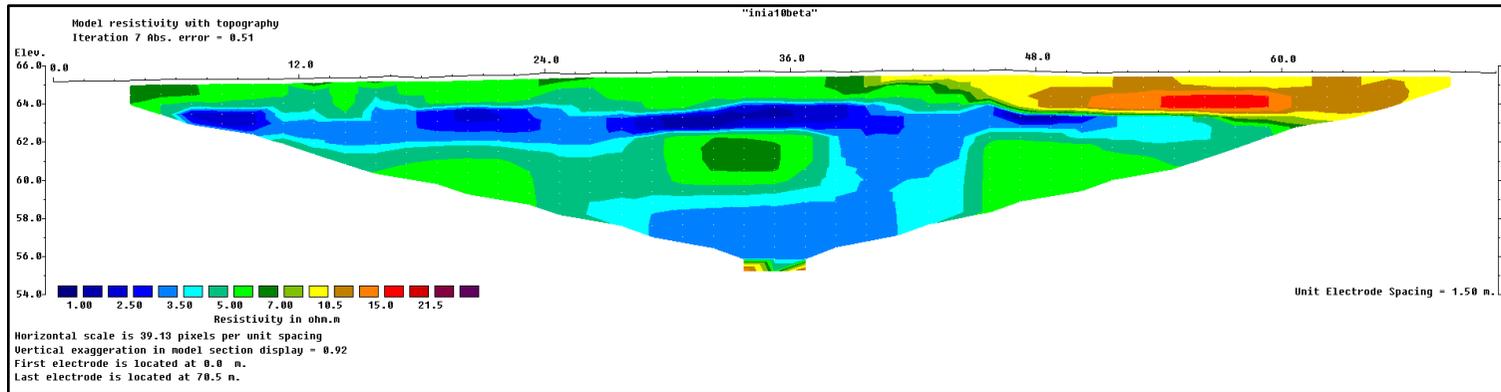


Figura A. 15: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 4 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

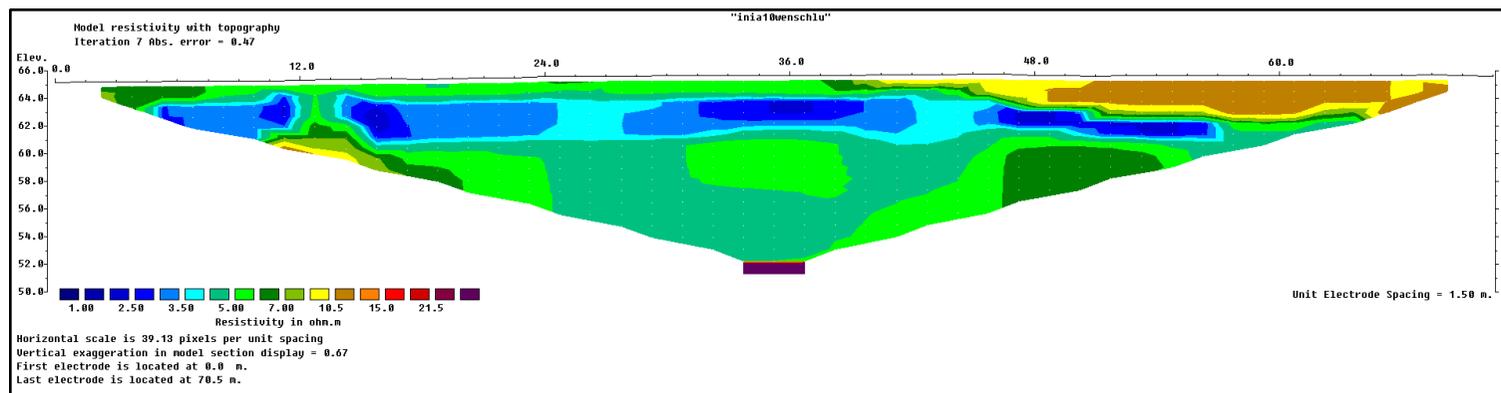


Figura A. 16: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 4 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

Perfil 5

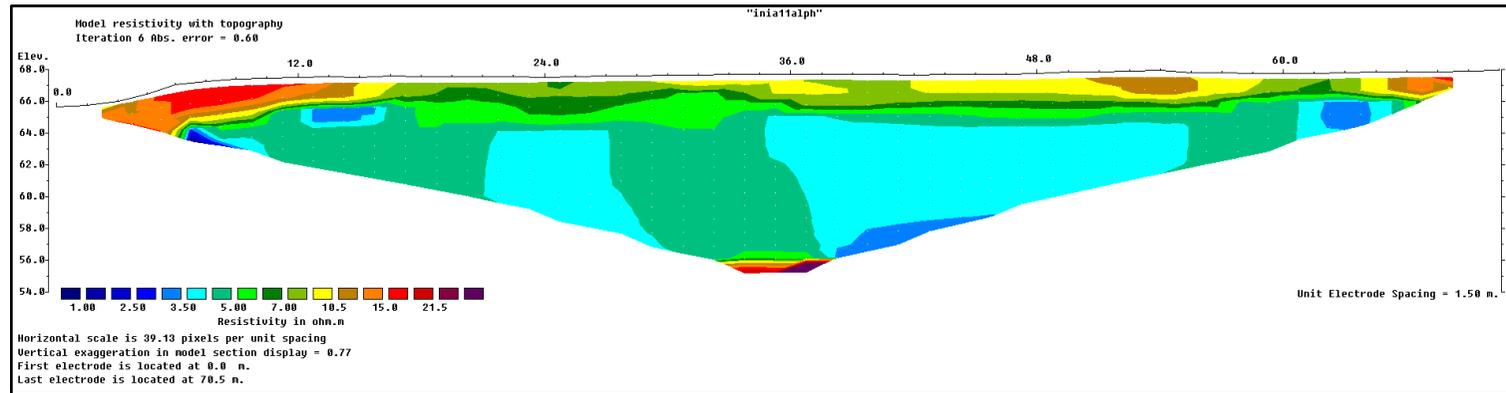


Figura A. 17: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 5 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

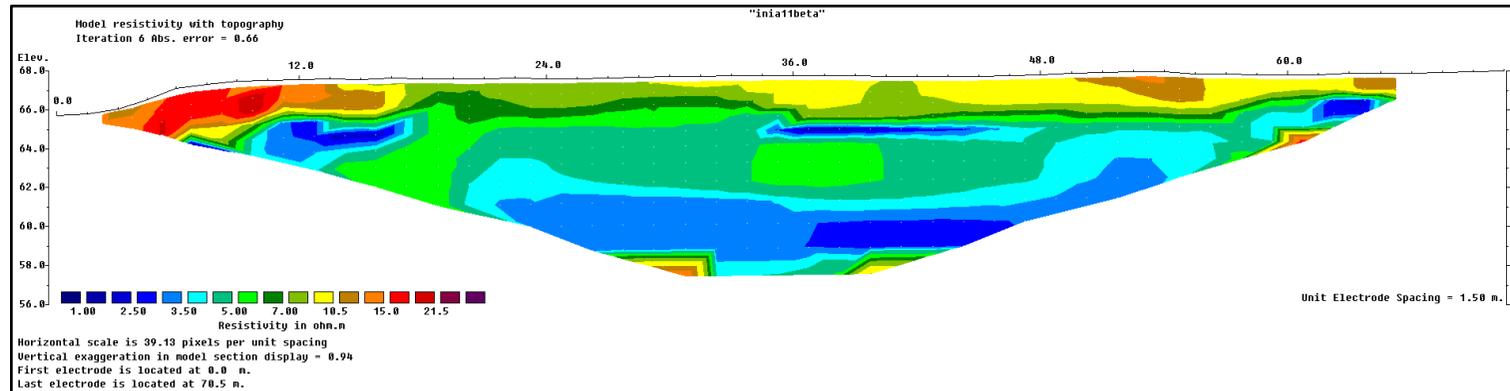


Figura A. 18: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 5 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

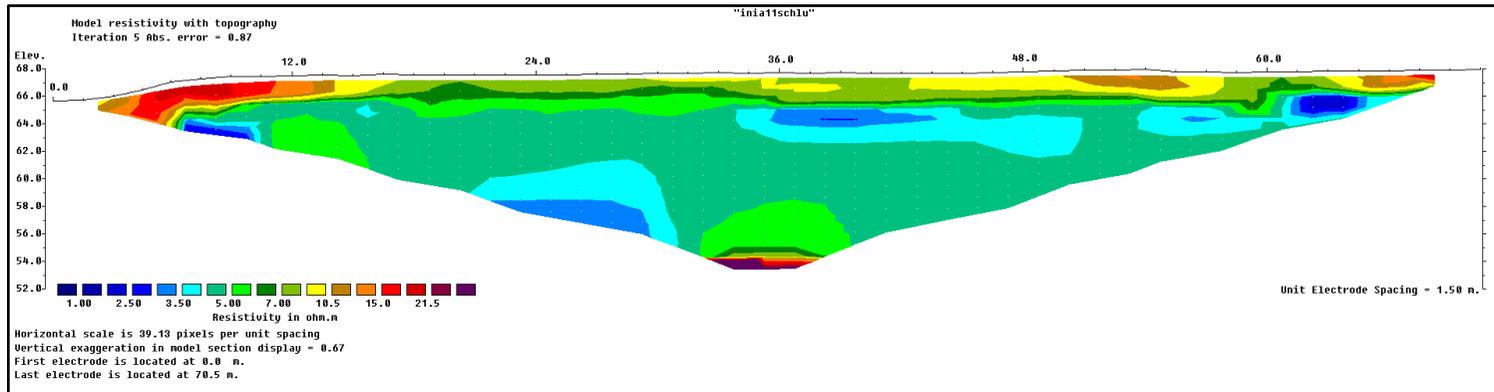


Figura A. 19: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 5 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.

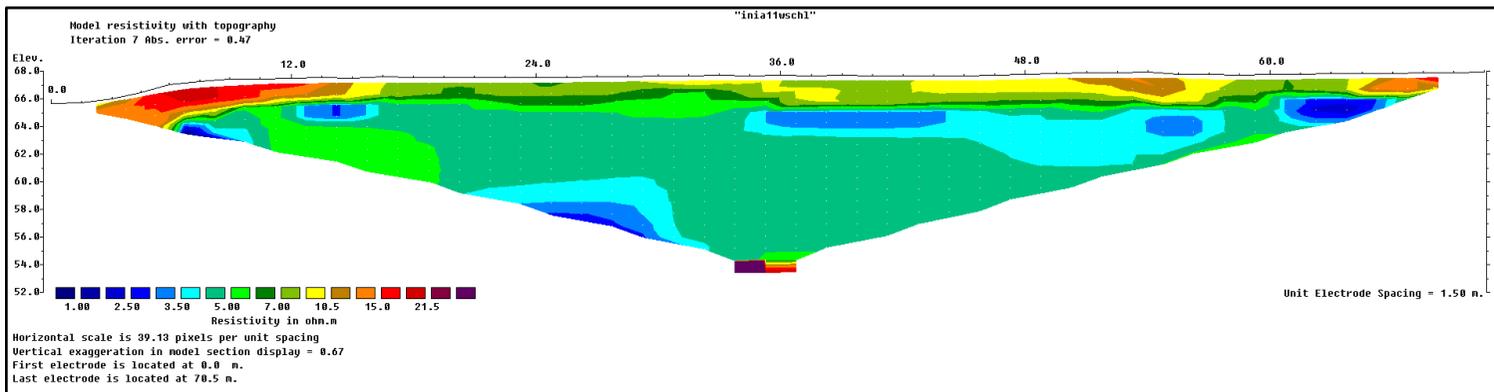


Figura A. 20: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 5 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

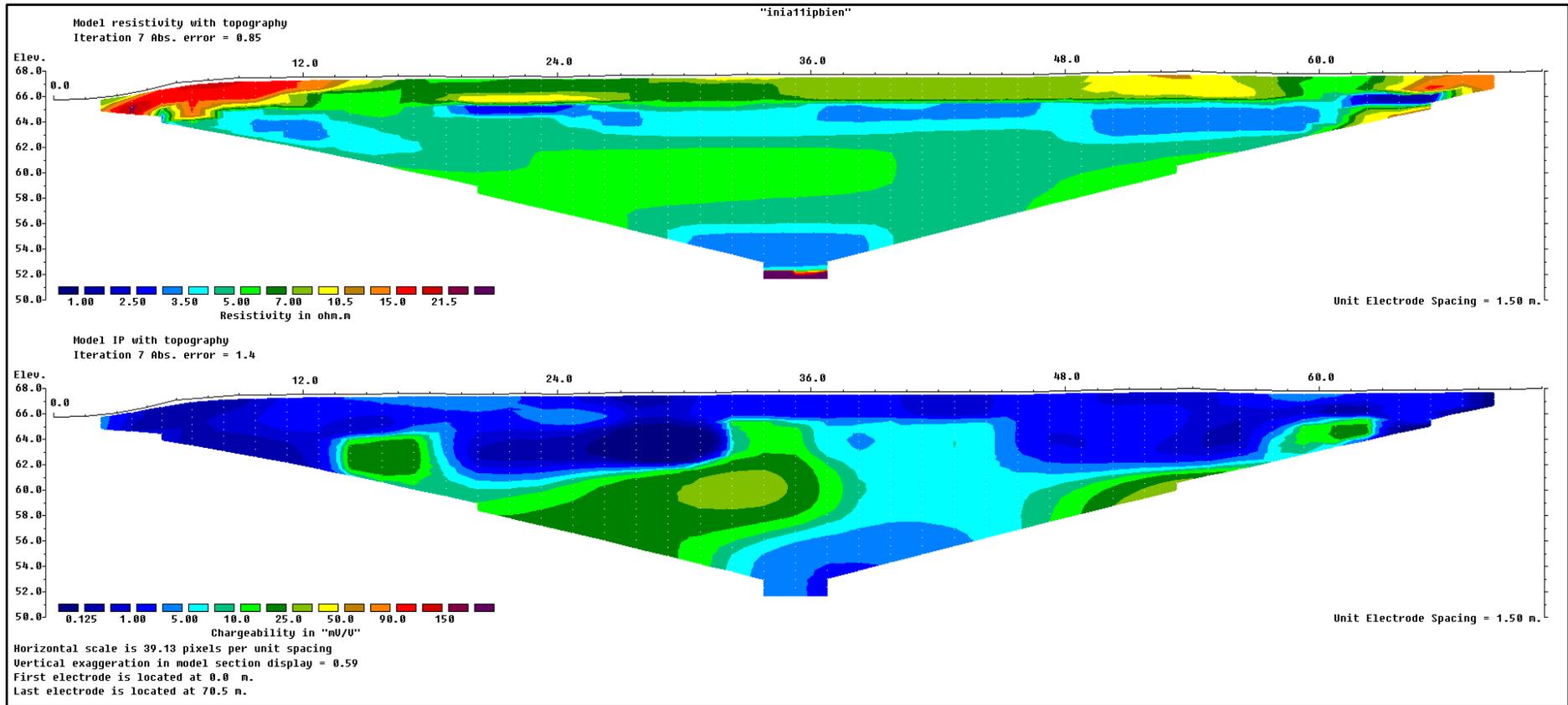


Figura A. 21: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 5 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

Perfil 6

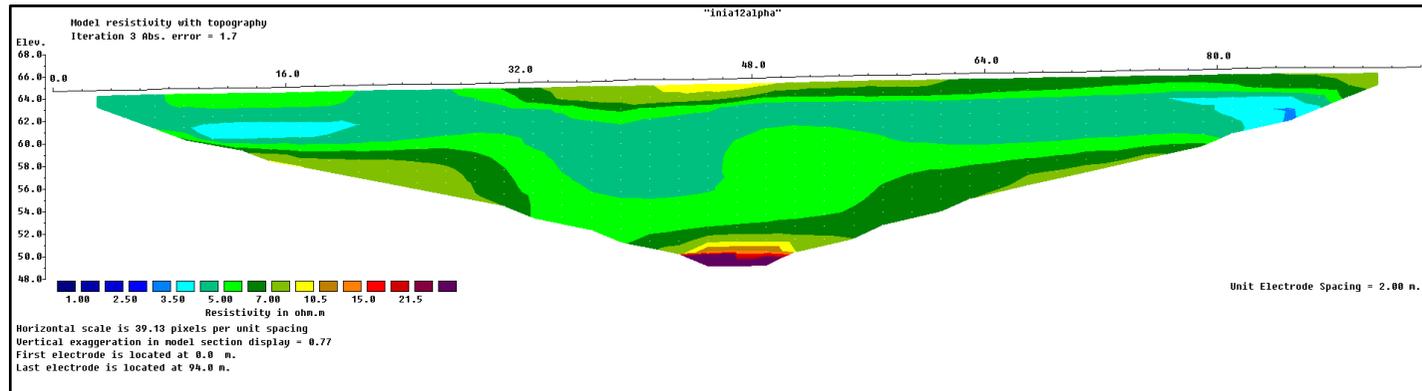


Figura A. 22: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 6 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

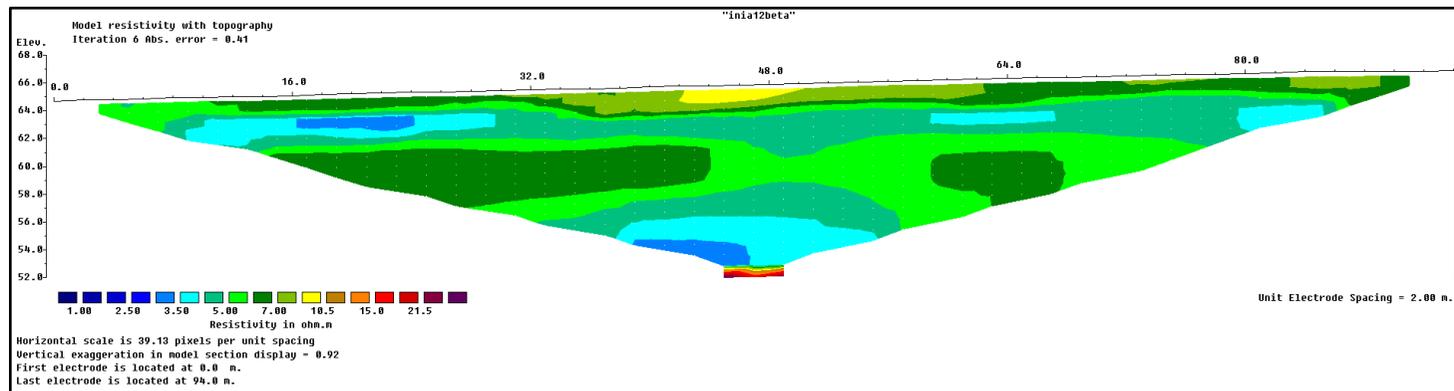


Figura A. 23: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 6 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

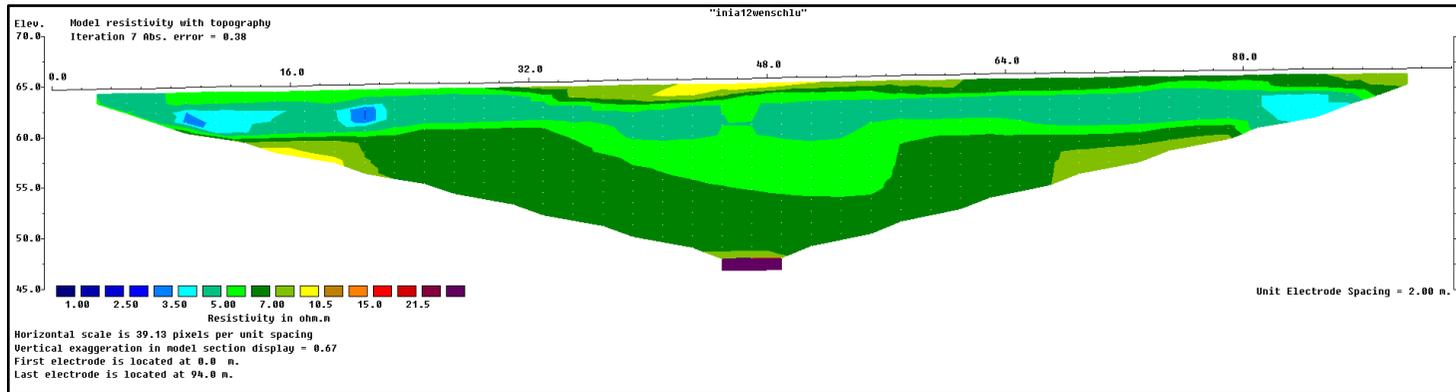


Figura A. 24: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 6 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

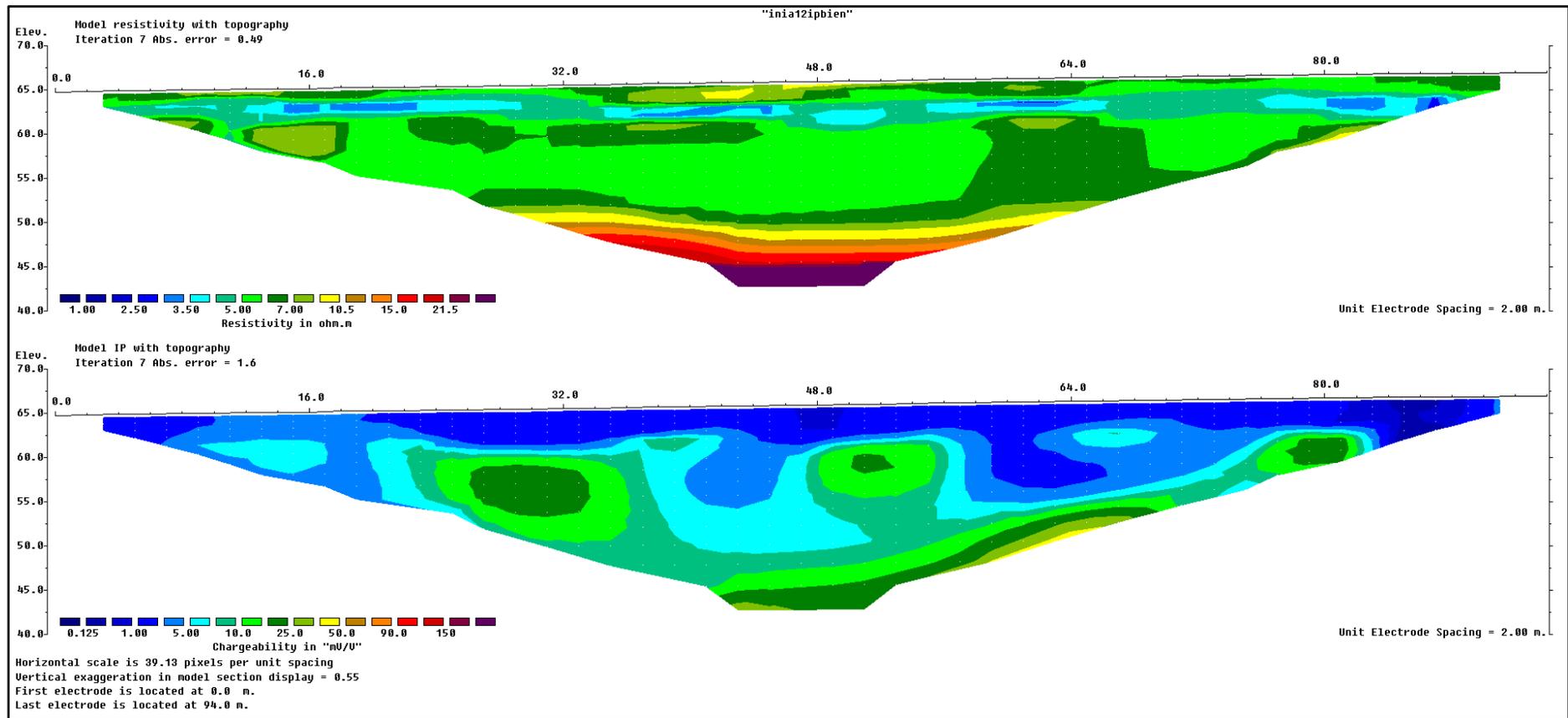


Figura A. 25: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 6 LA, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

7.1.1.2 Laguna Geomembrana
 Perfil 1

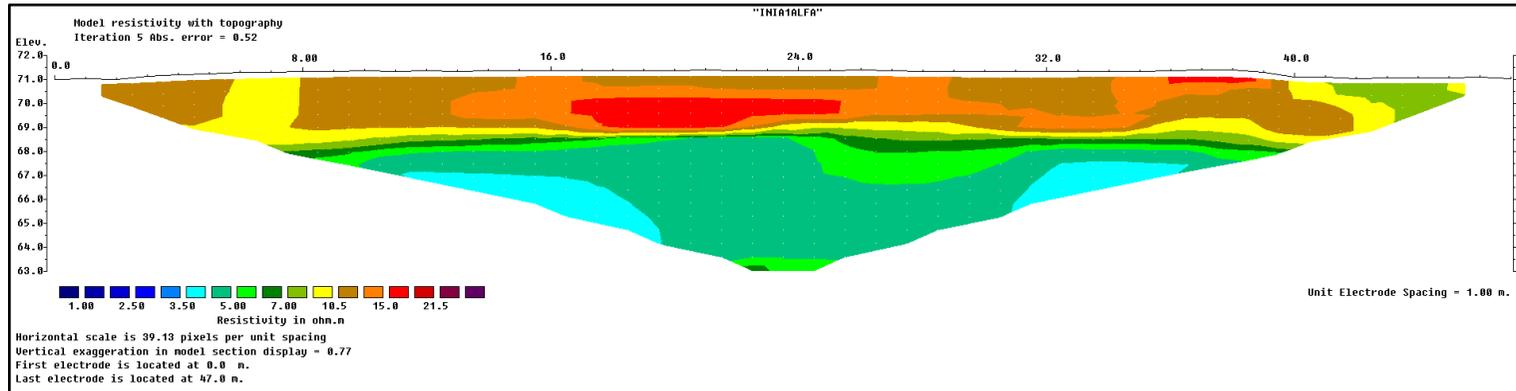


Figura A. 26: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

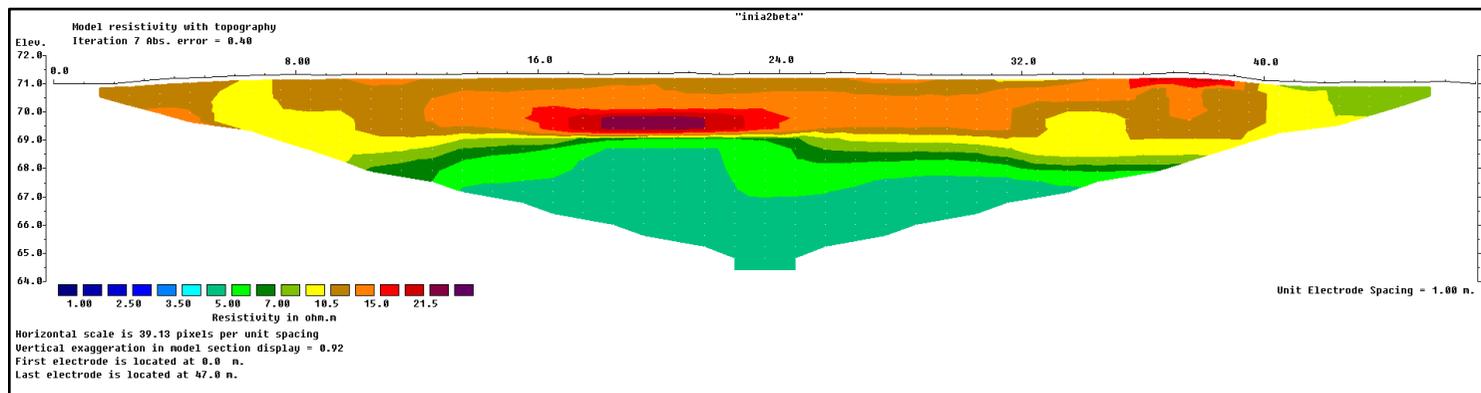


Figura A. 27: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

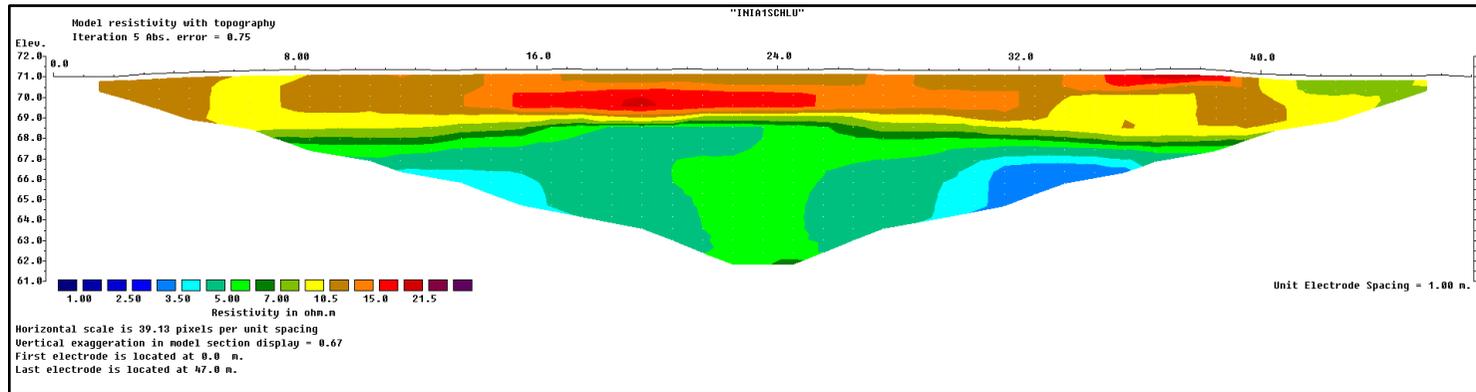


Figura A. 28: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.

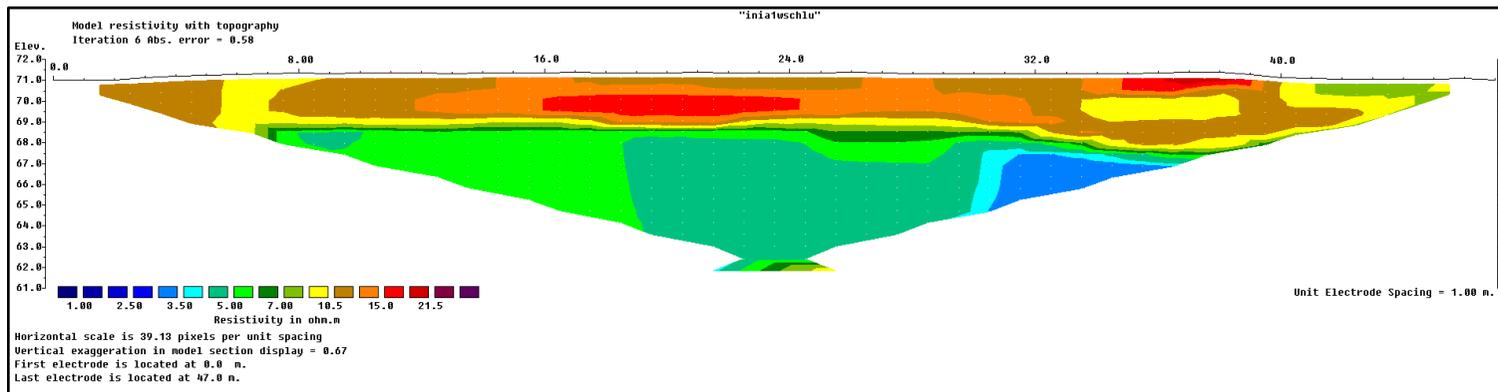


Figura A. 29: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger

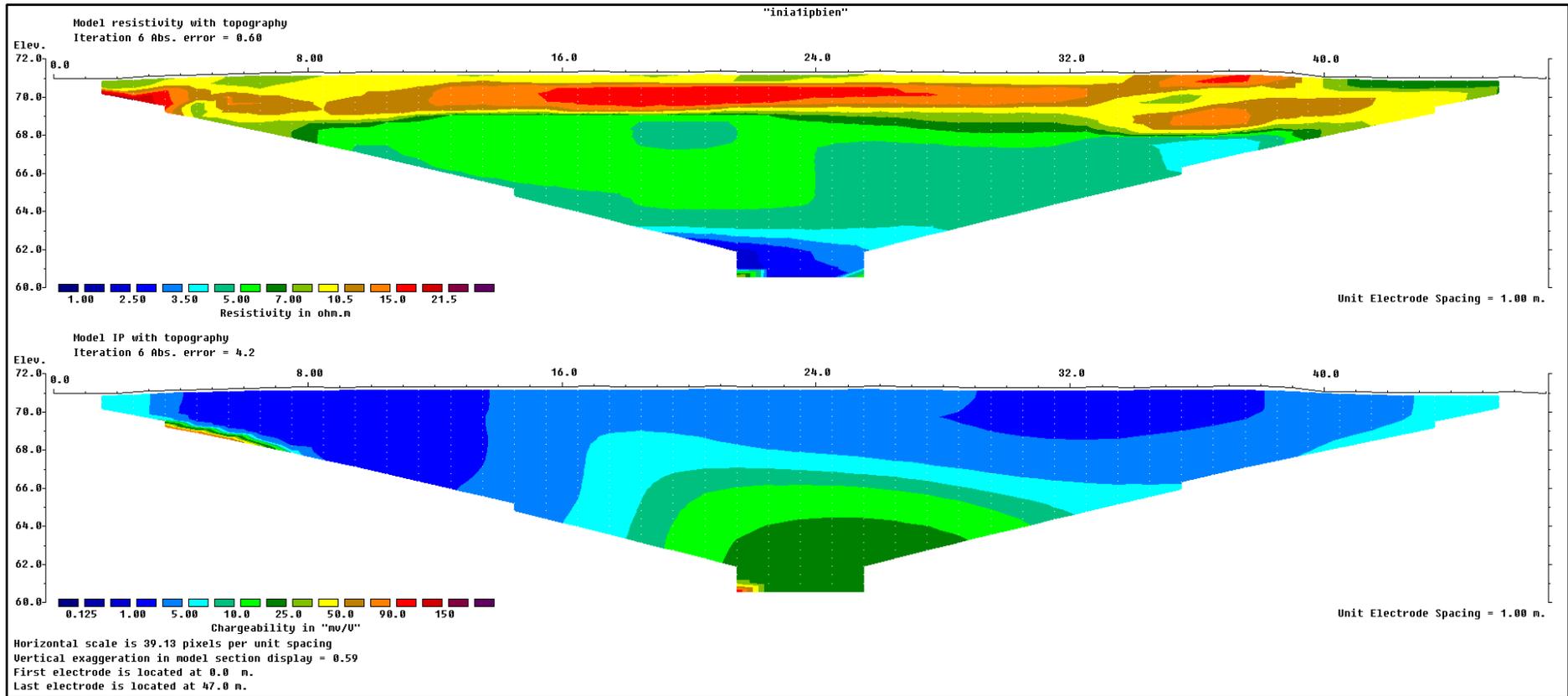


Figura A. 30: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

Perfil 2

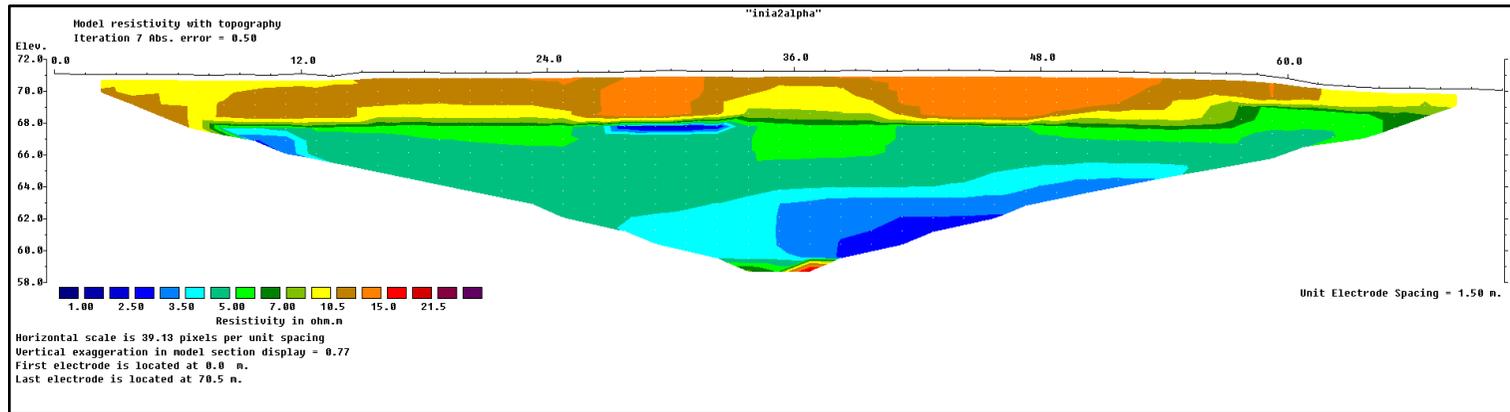


Figura A. 31: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 2 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

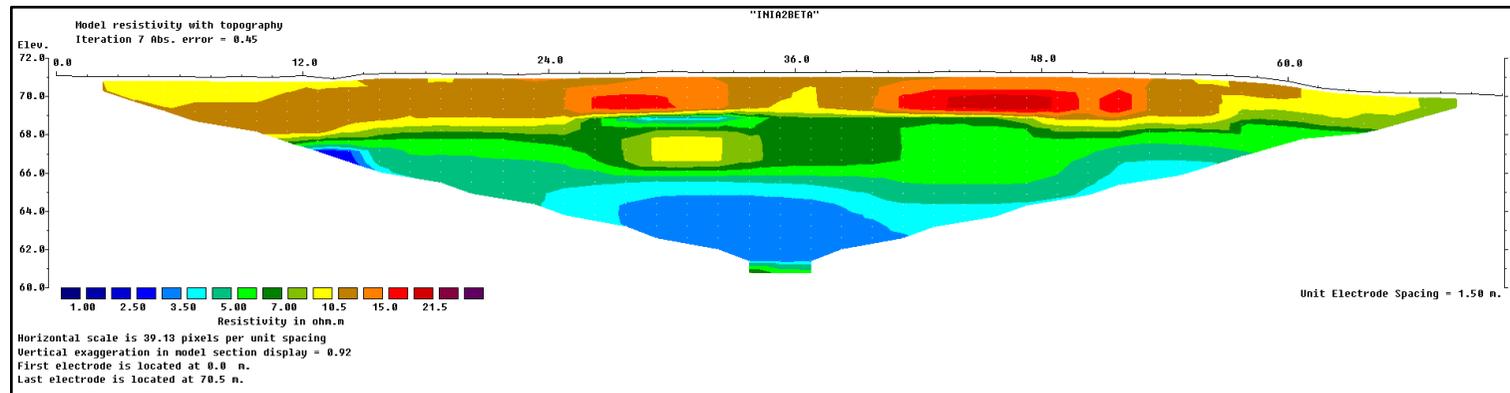


Figura A. 32: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 2 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

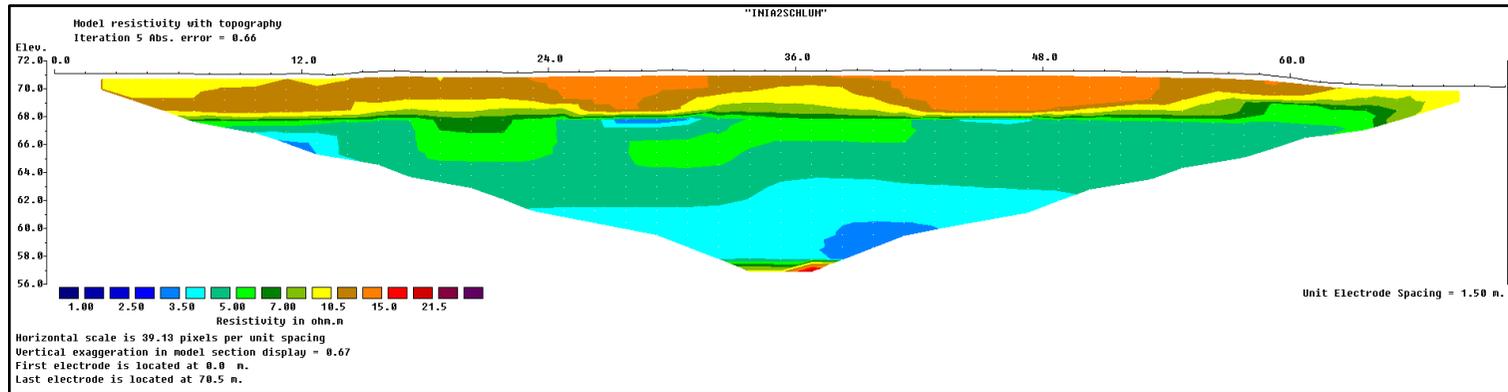


Figura A. 33: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 2 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.

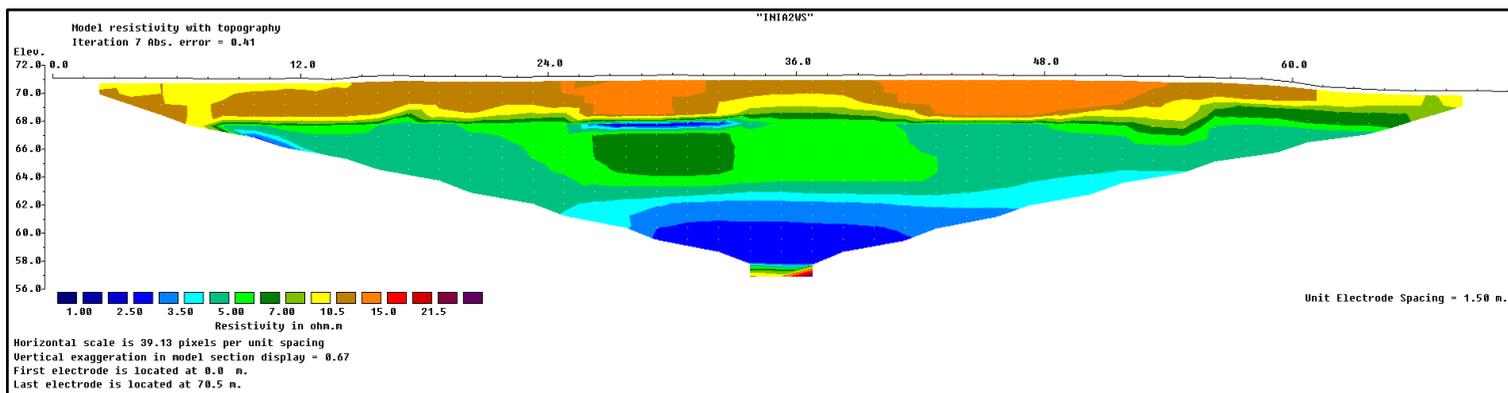


Figura A. 34: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 2 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

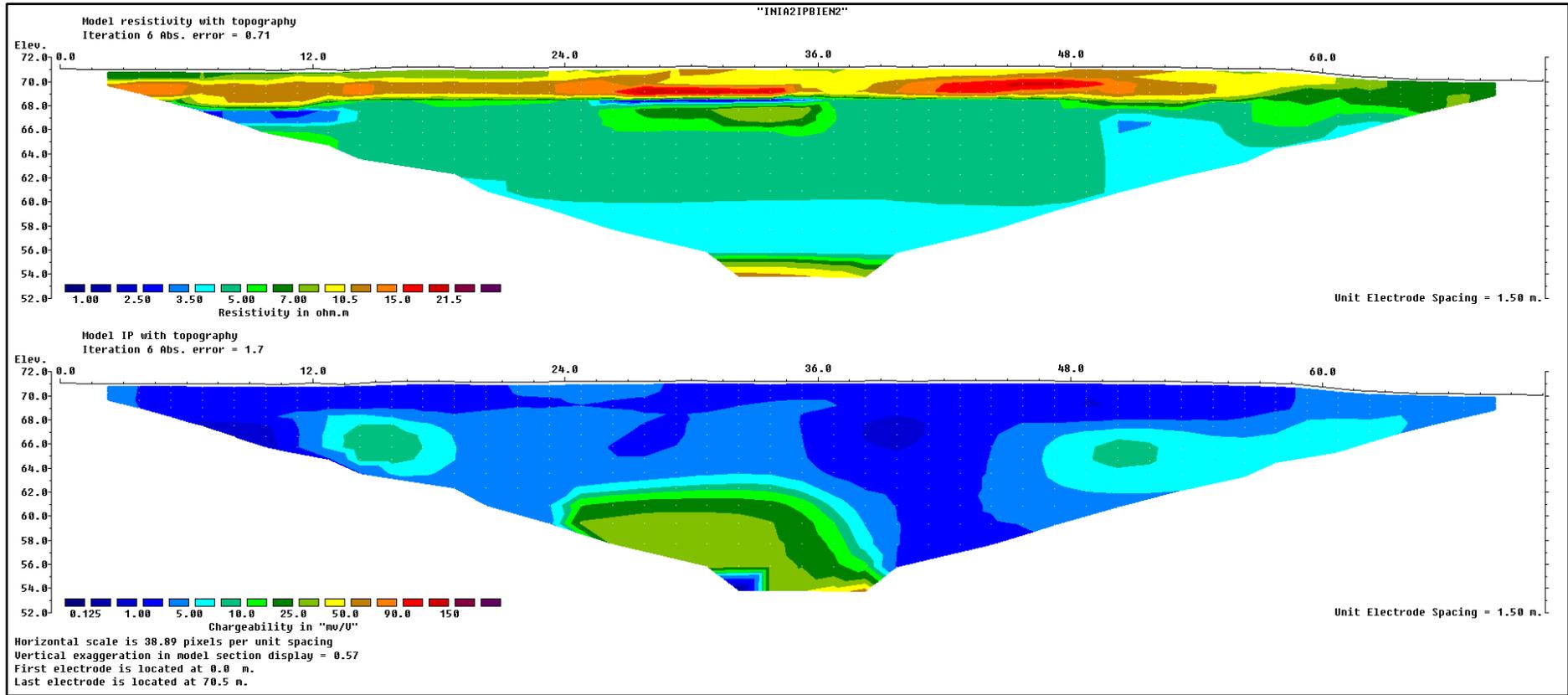


Figura A. 35: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 2 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

Perfil 3

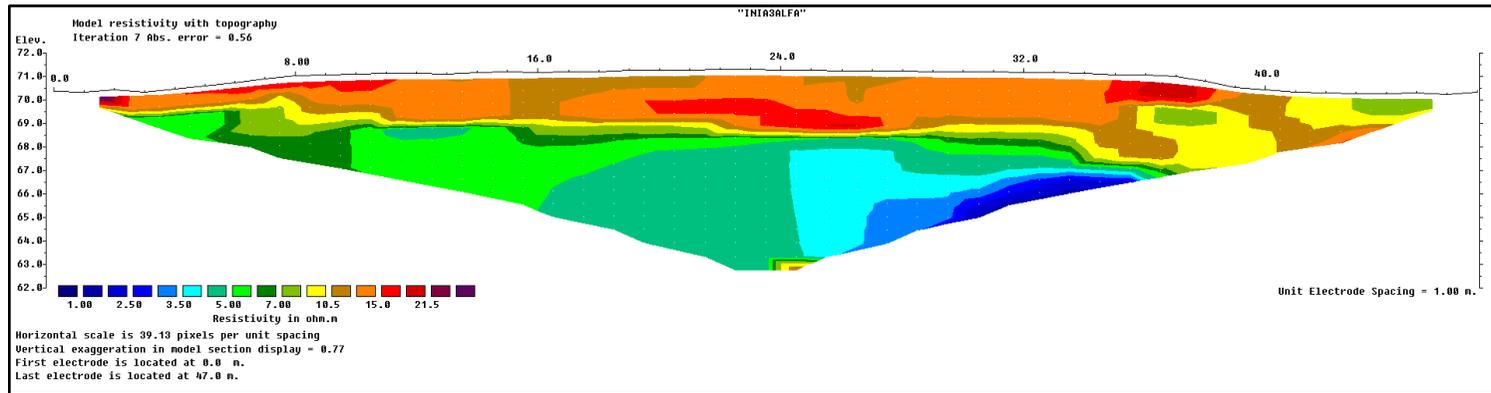


Figura A. 36: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 3 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

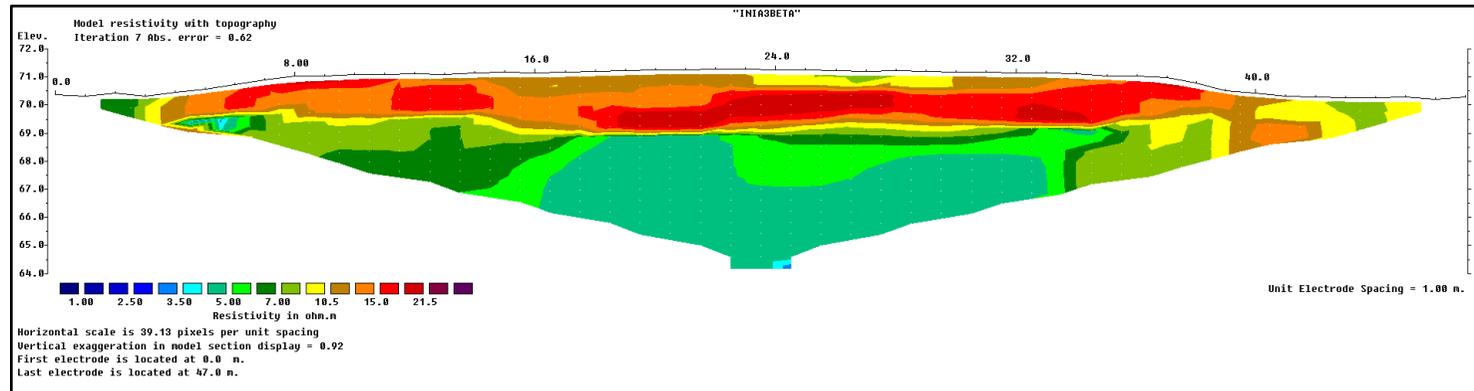


Figura A. 37: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 3 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

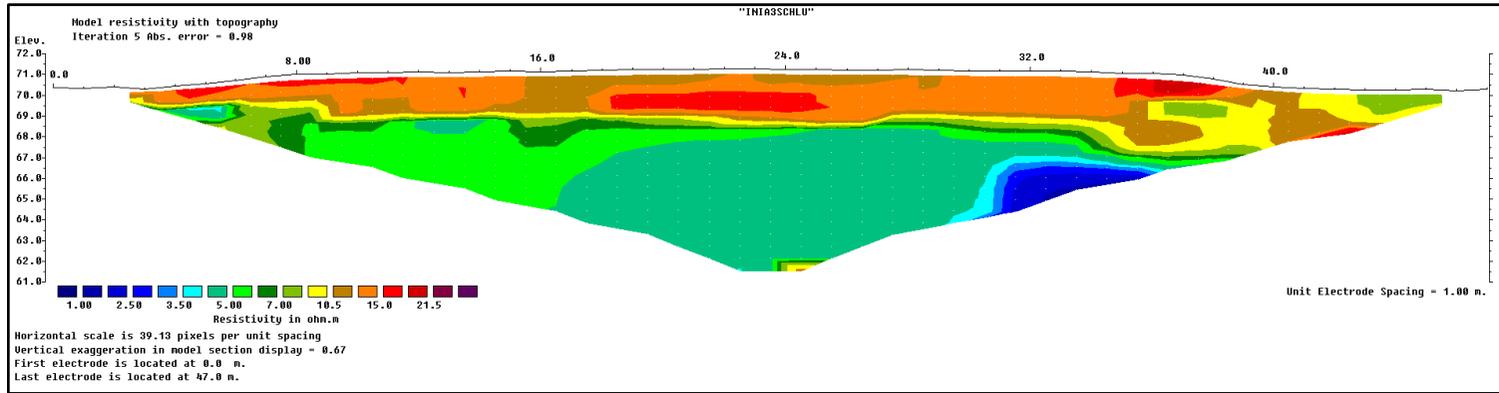


Figura A. 38: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 3 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.

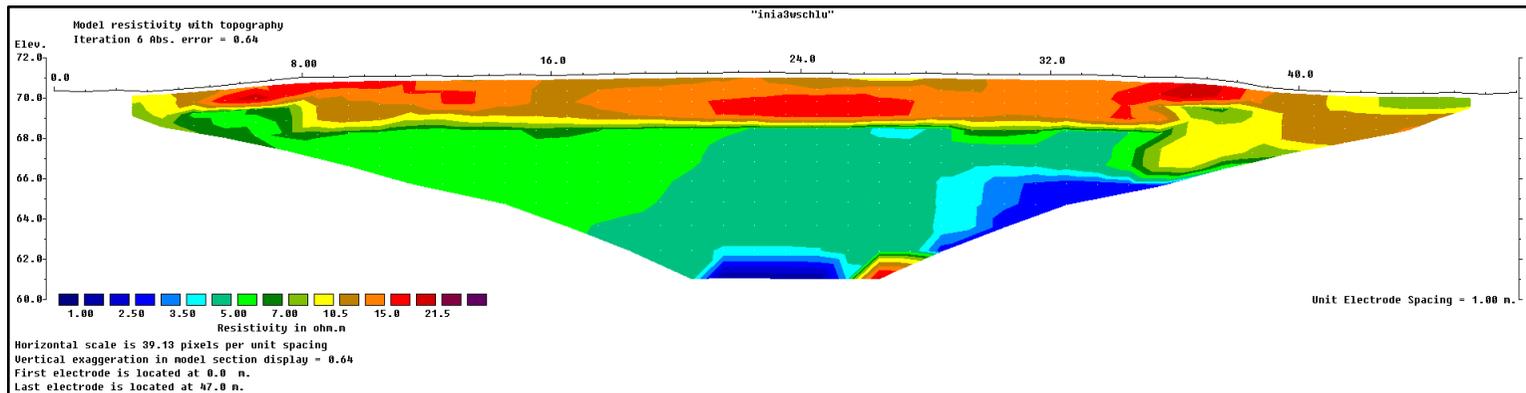


Figura A. 39: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 3 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

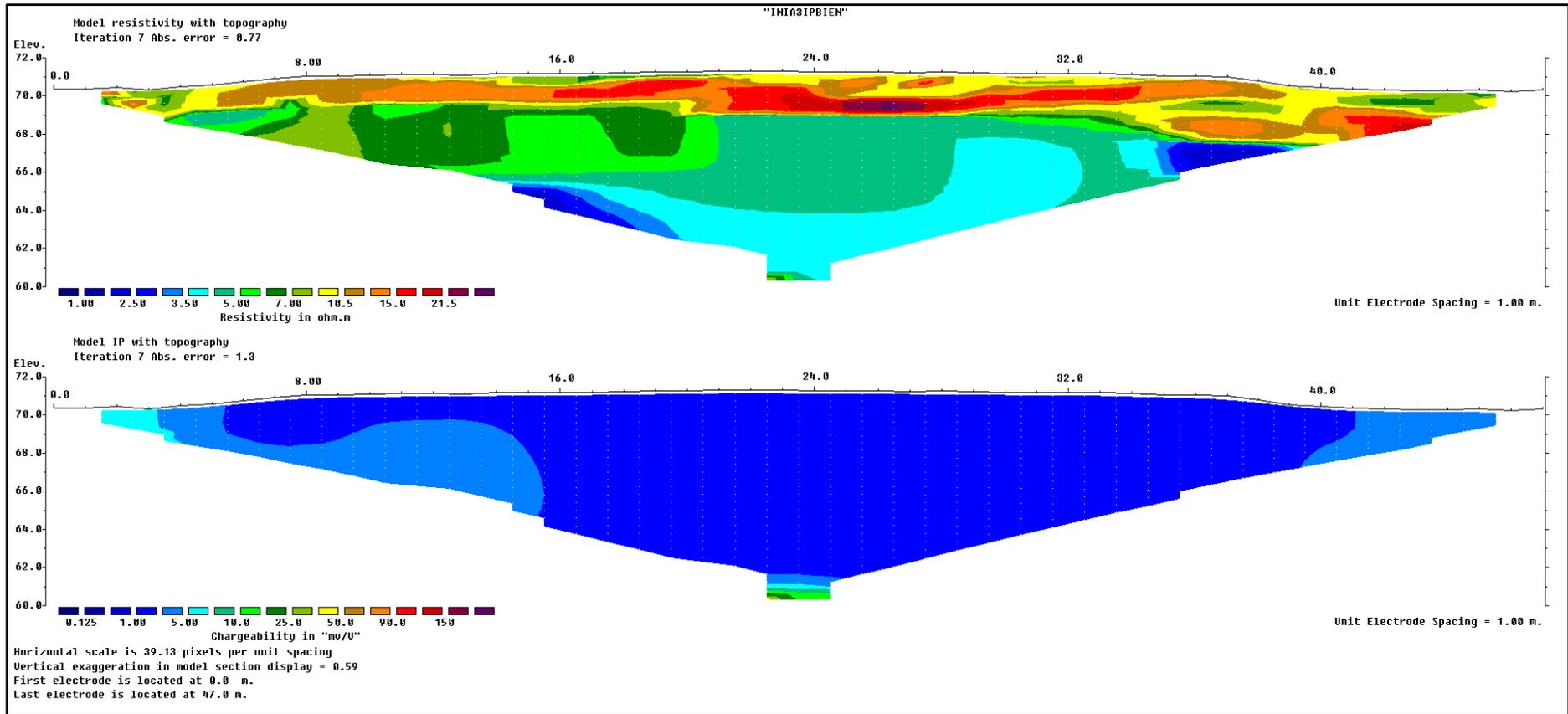


Figura A. 40: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 3 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

Perfil 4

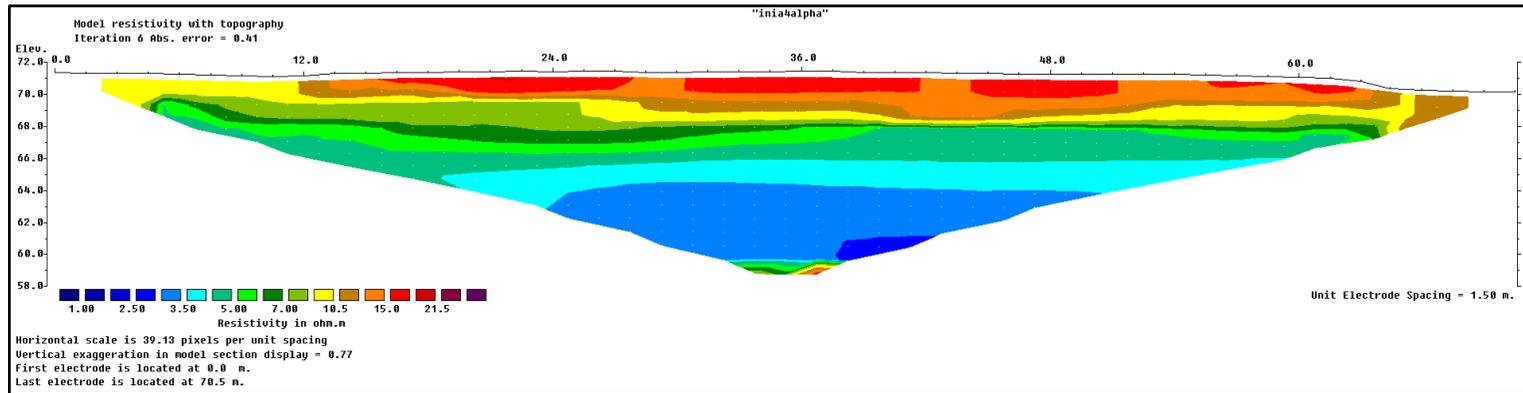


Figura A. 41: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 4 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

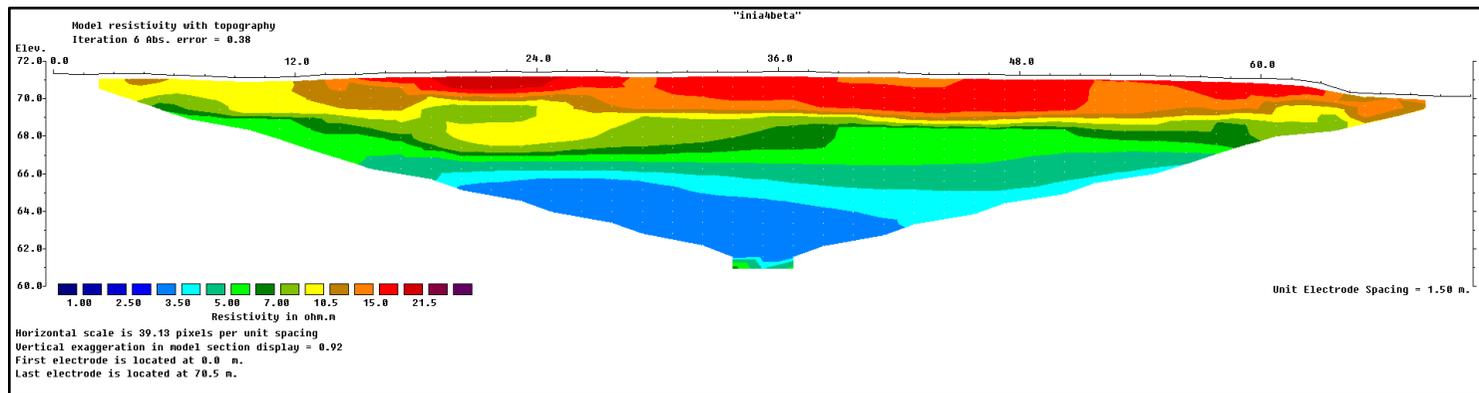


Figura A. 42: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 4 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

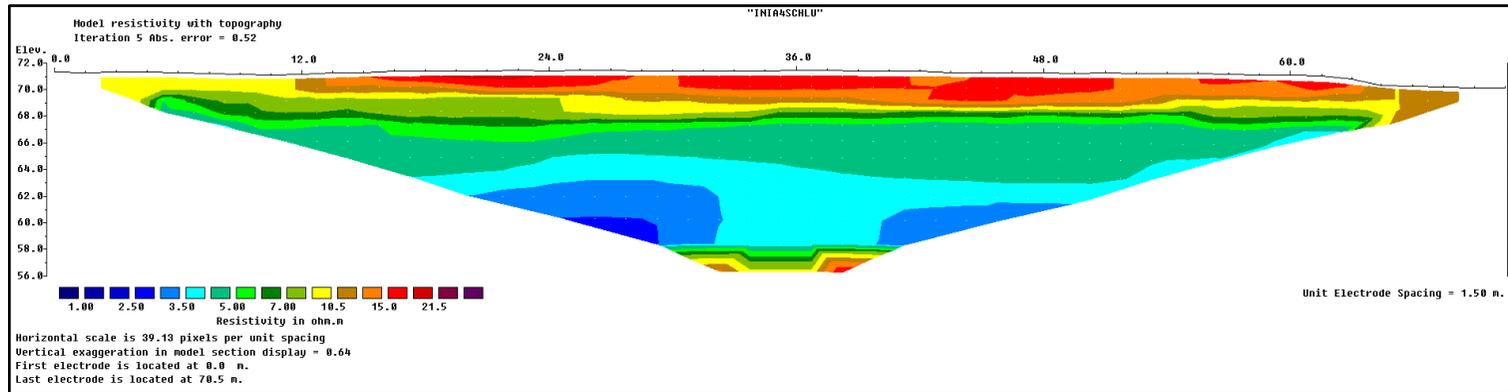


Figura A. 43: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 4 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.

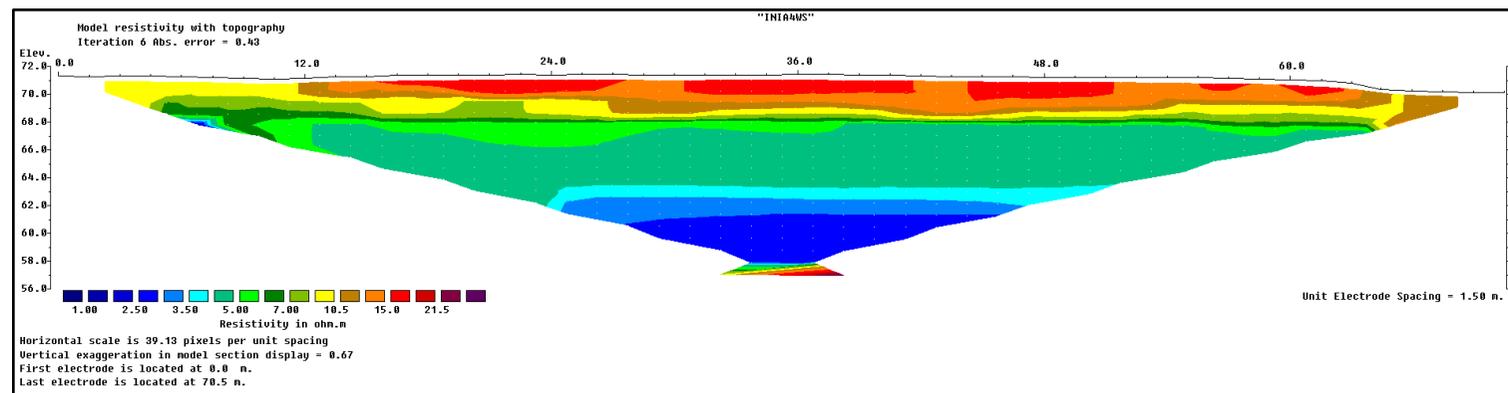


Figura A. 44: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 4 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

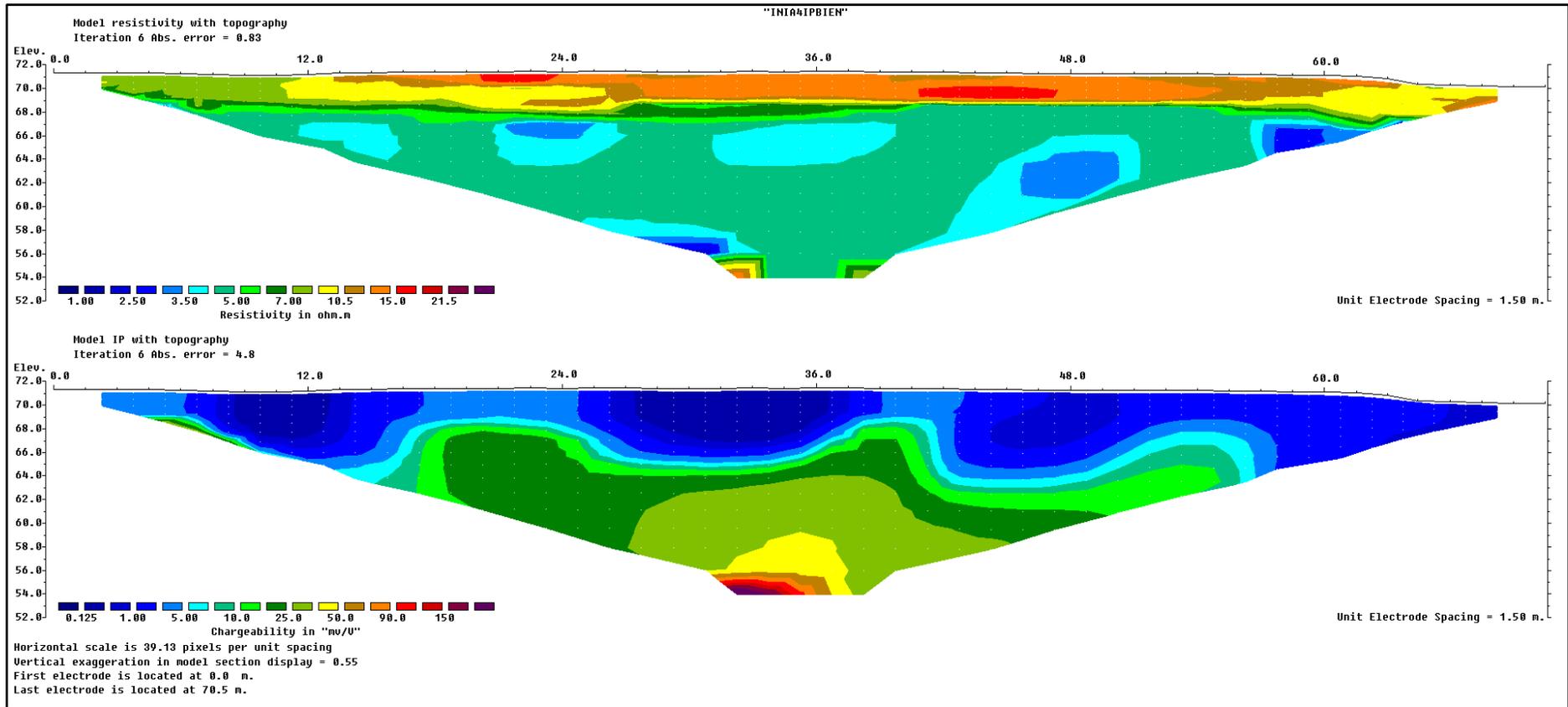


Figura A. 45: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 4 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

Perfil 5

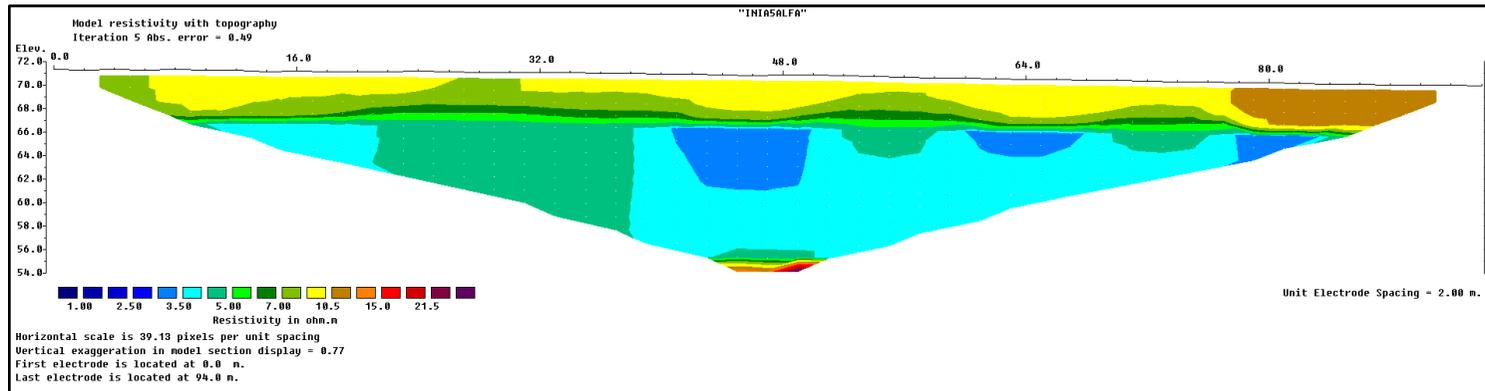


Figura A. 46: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 5 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

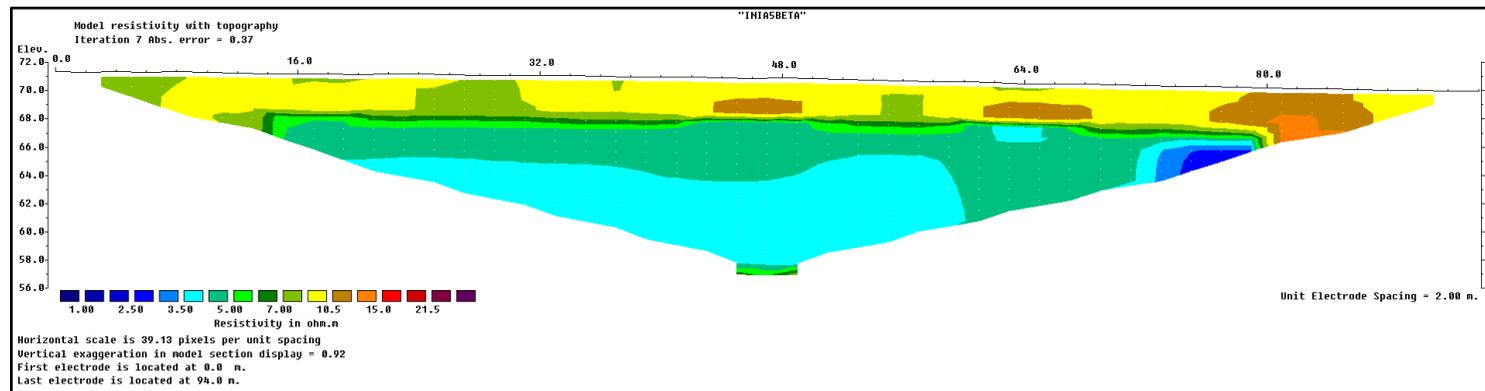


Figura A. 47: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 5 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

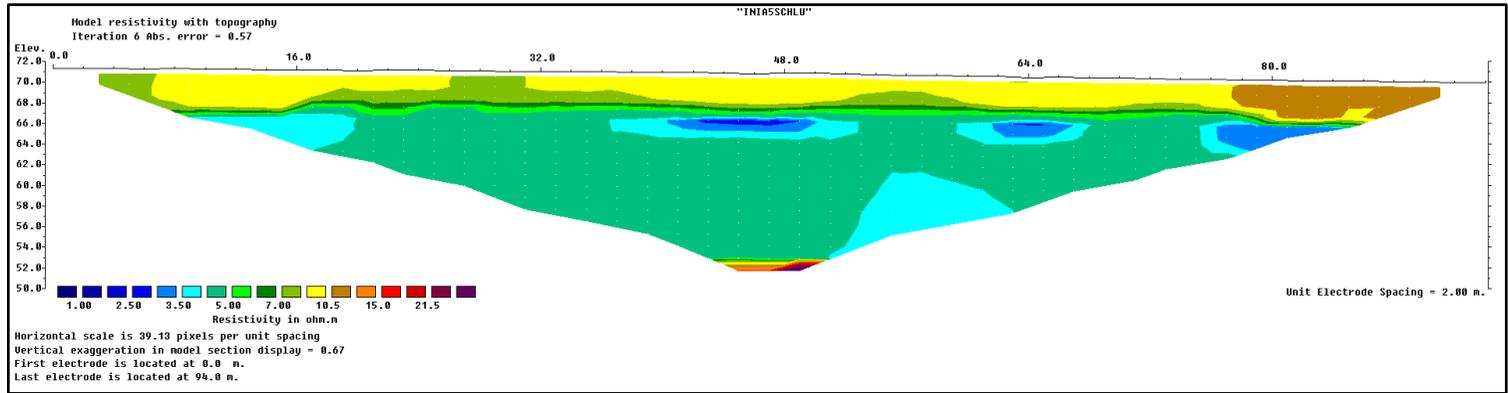


Figura A. 48: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 5 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.

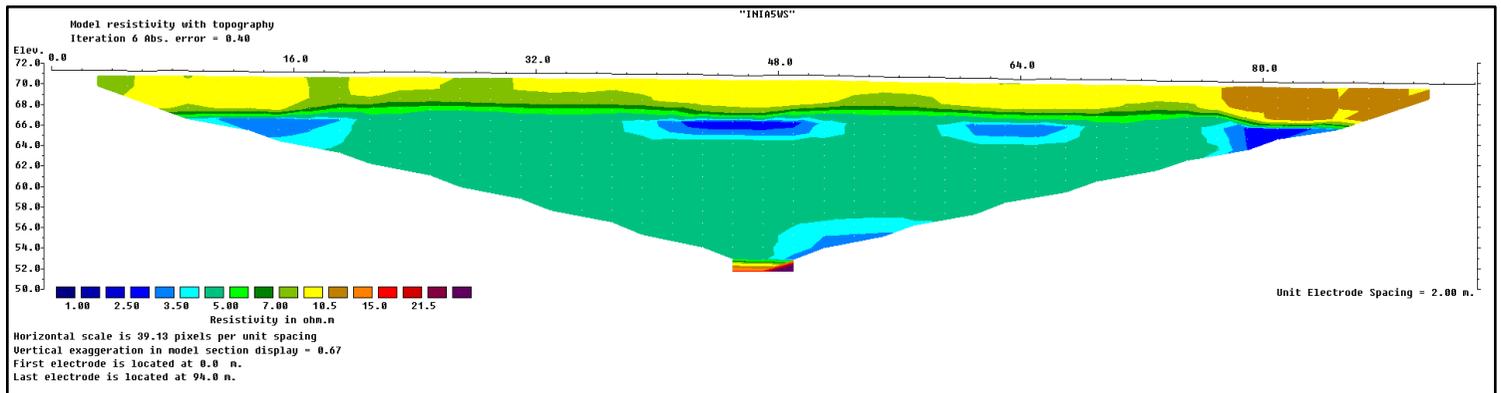


Figura A. 49: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 5 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

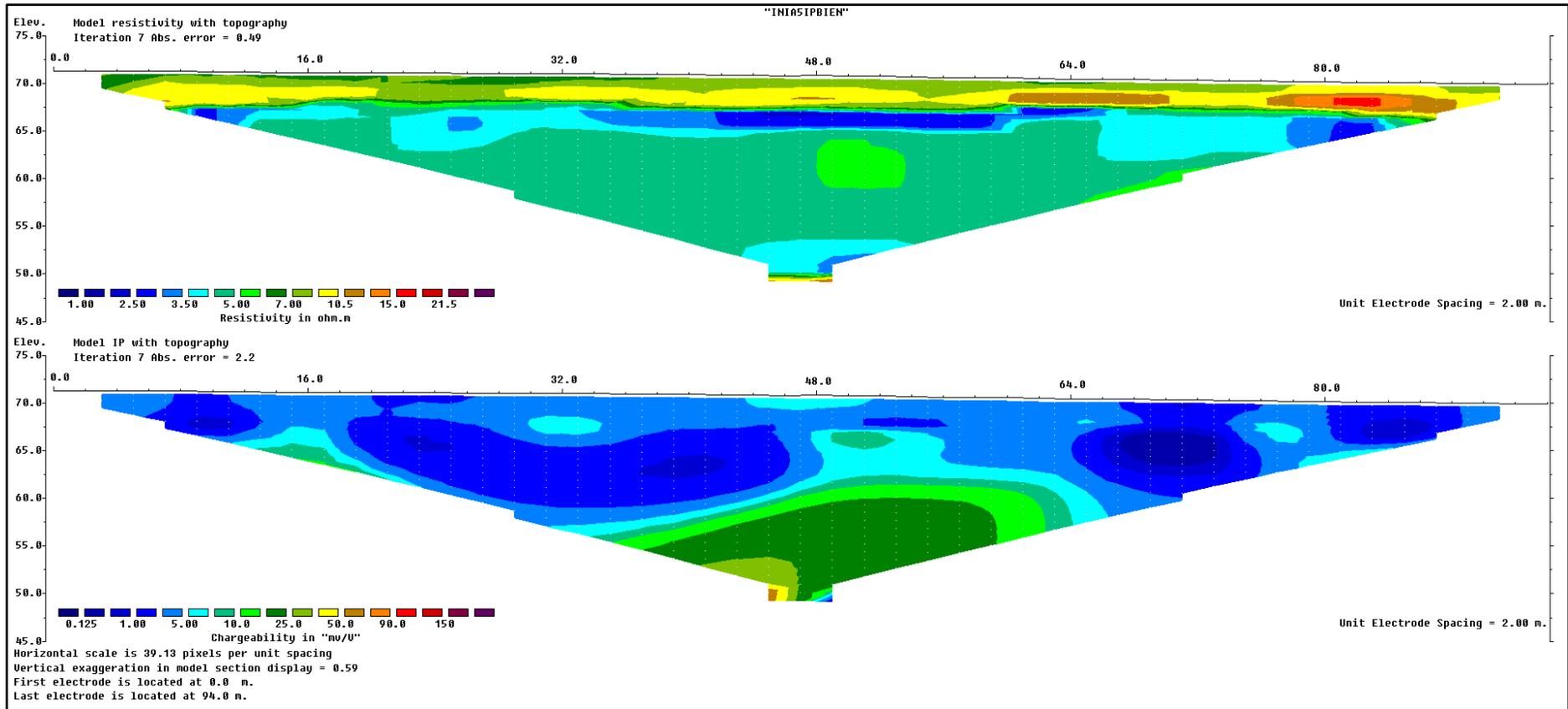


Figura A. 50: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 5 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

Perfil 6

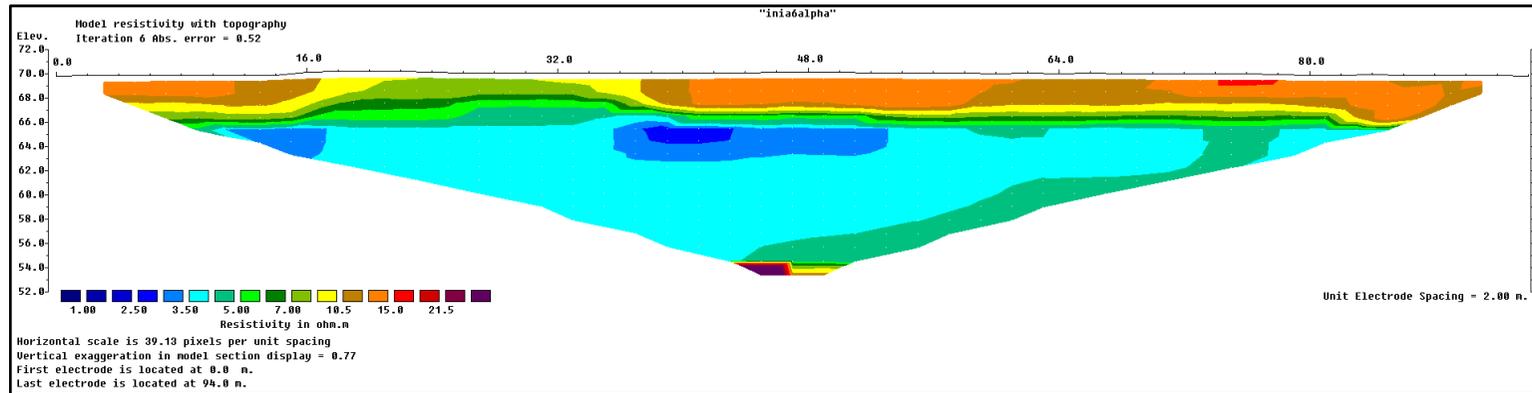


Figura A. 51: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 6 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

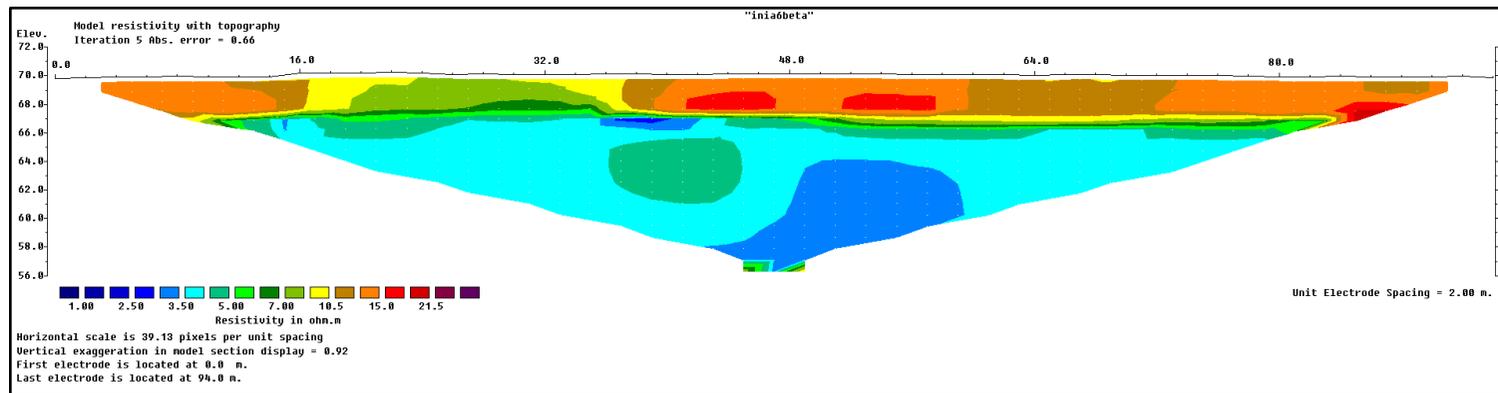


Figura A. 52: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 6 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

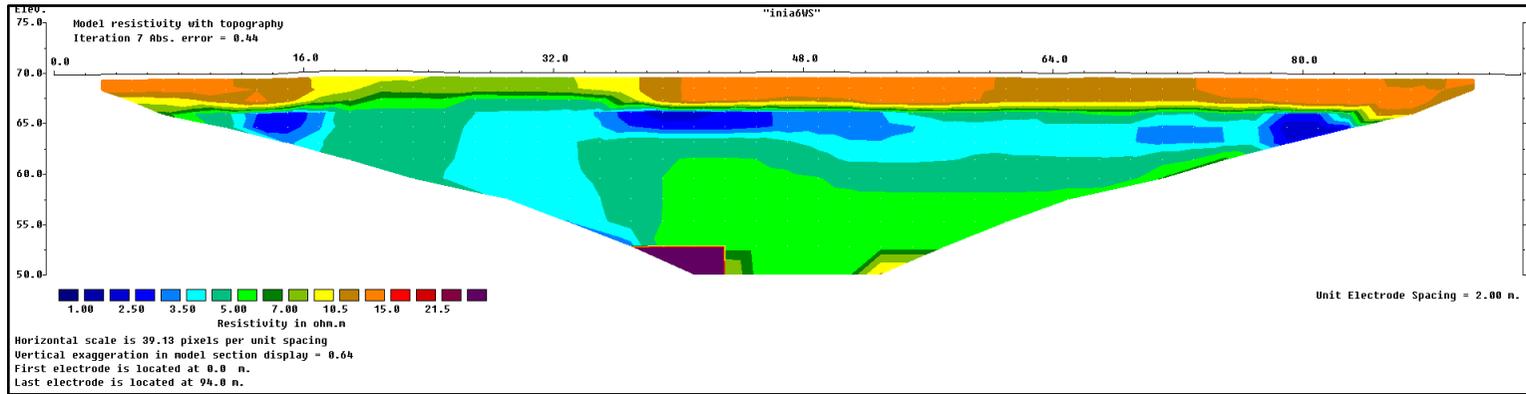


Figura A. 53: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 6 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

Perfil 7

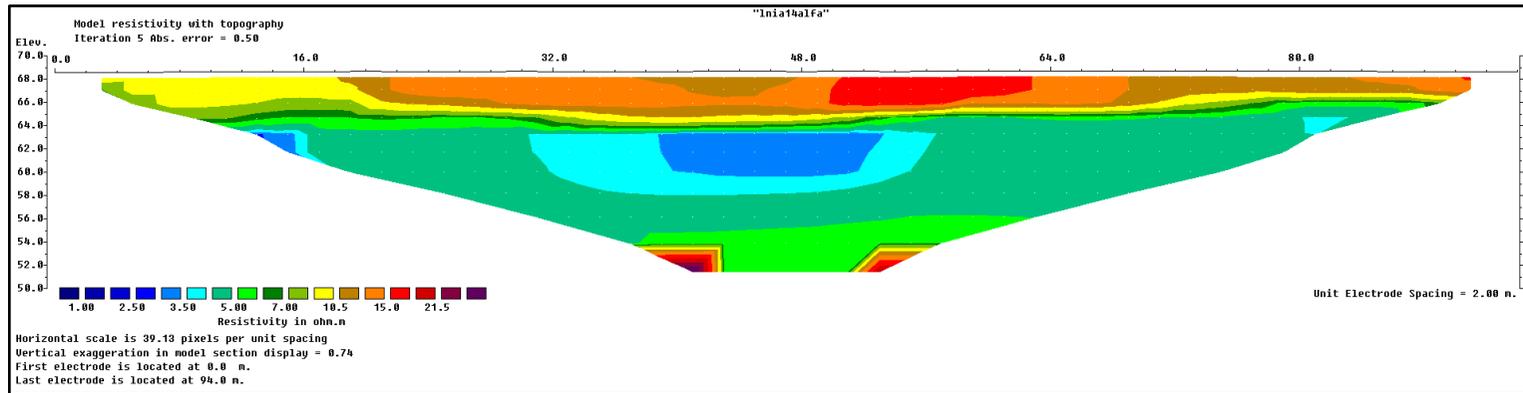


Figura A. 54: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 7 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

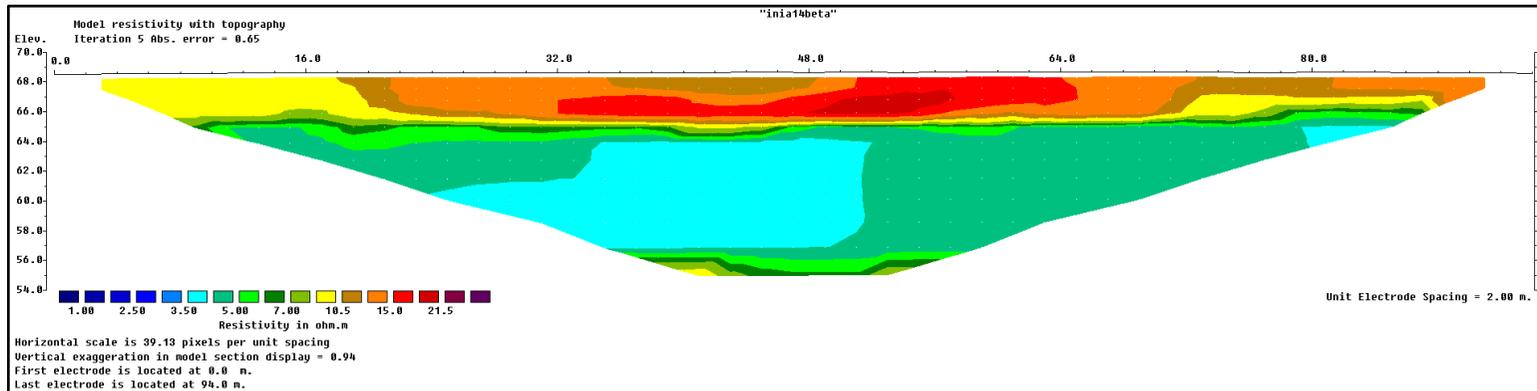


Figura A. 55: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 7 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

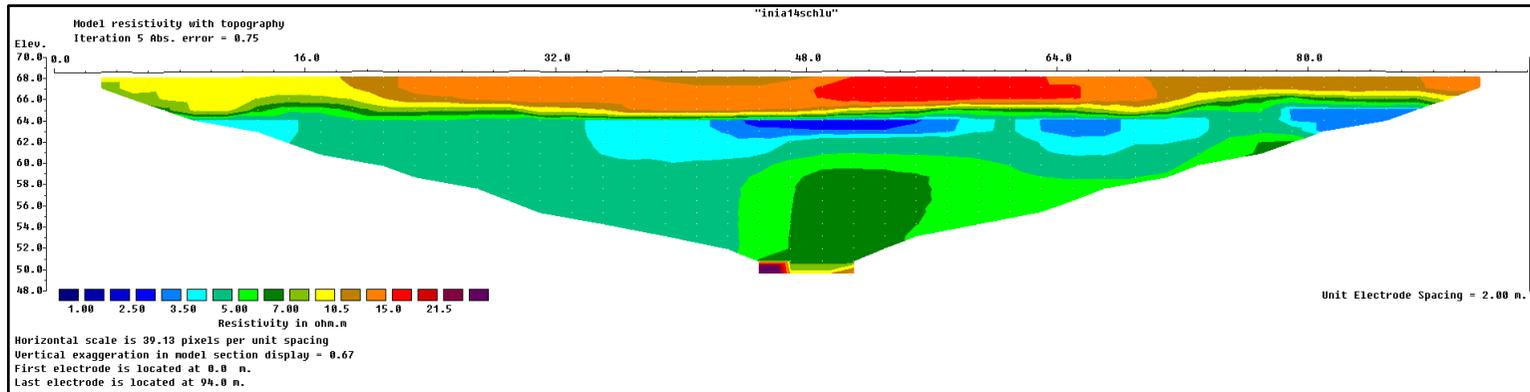


Figura A. 56: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 7 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.

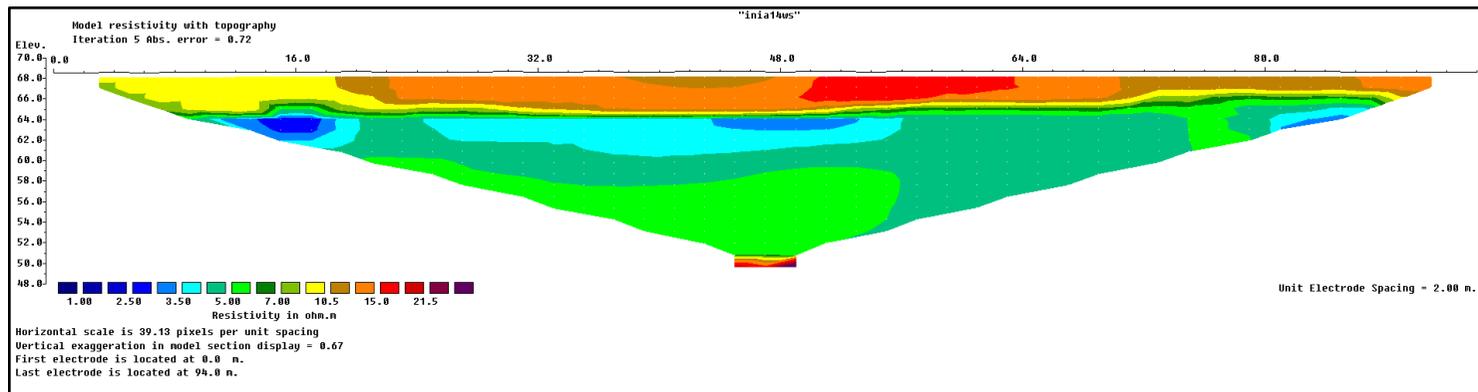


Figura A. 57: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 7 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

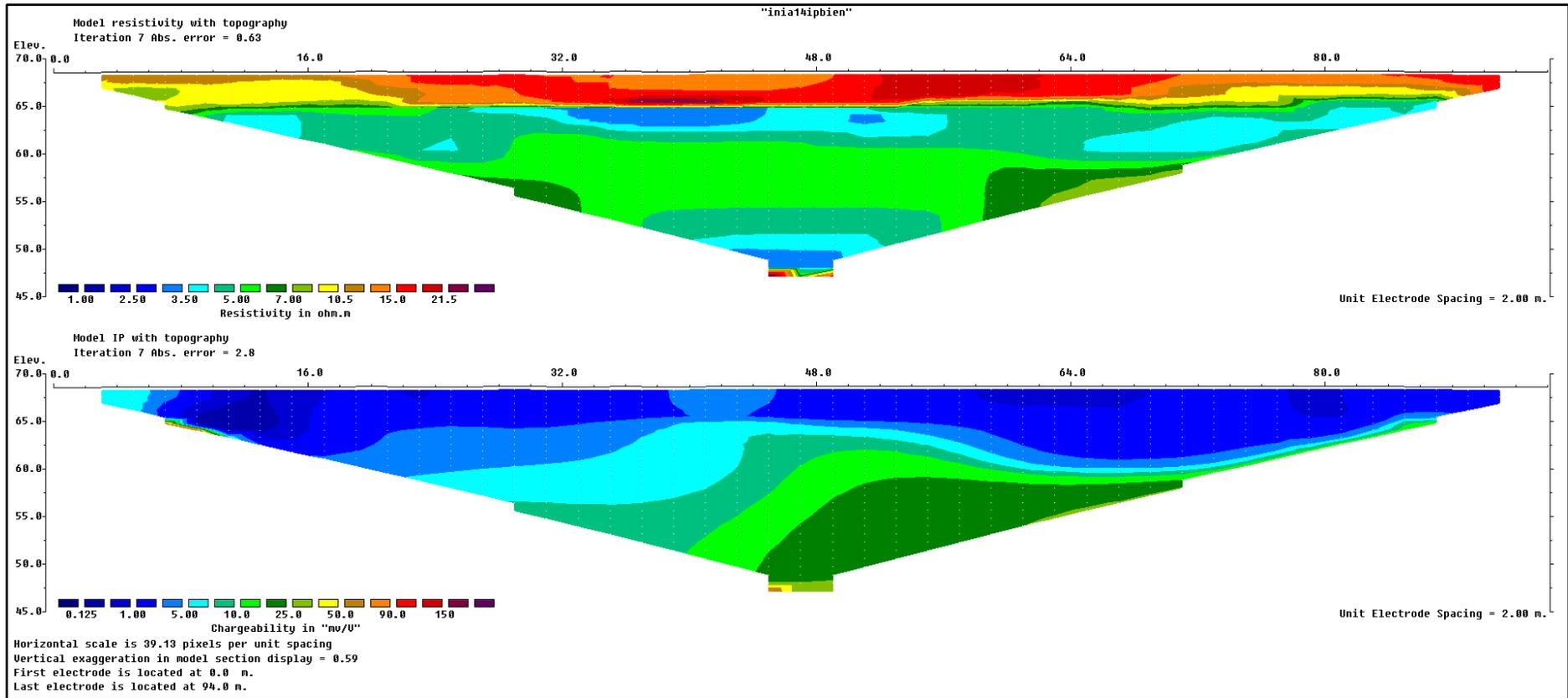


Figura A. 58: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 7 LG, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

7.1.1.3 Sitio Blanco

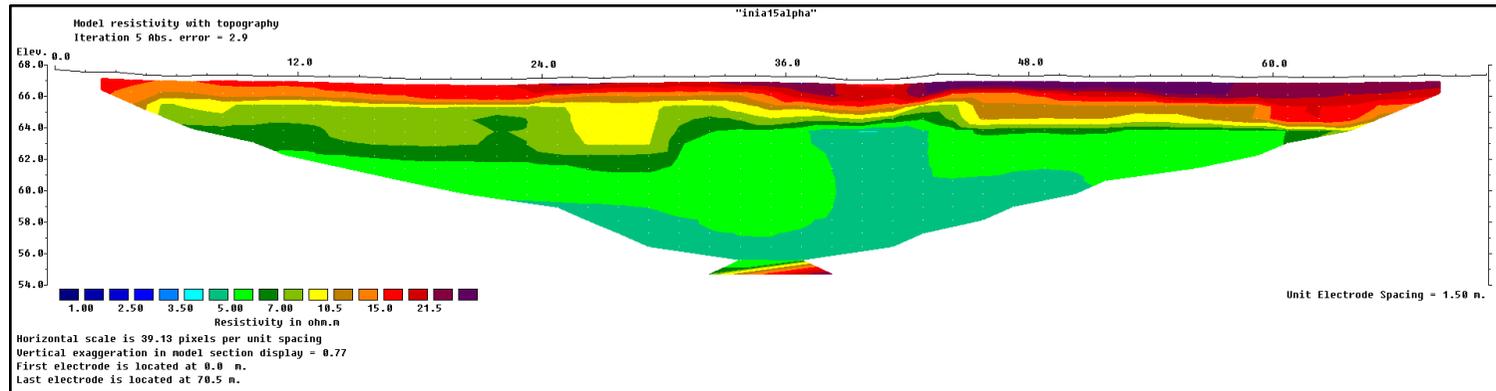


Figura A. 59: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT Sitio Blanco, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

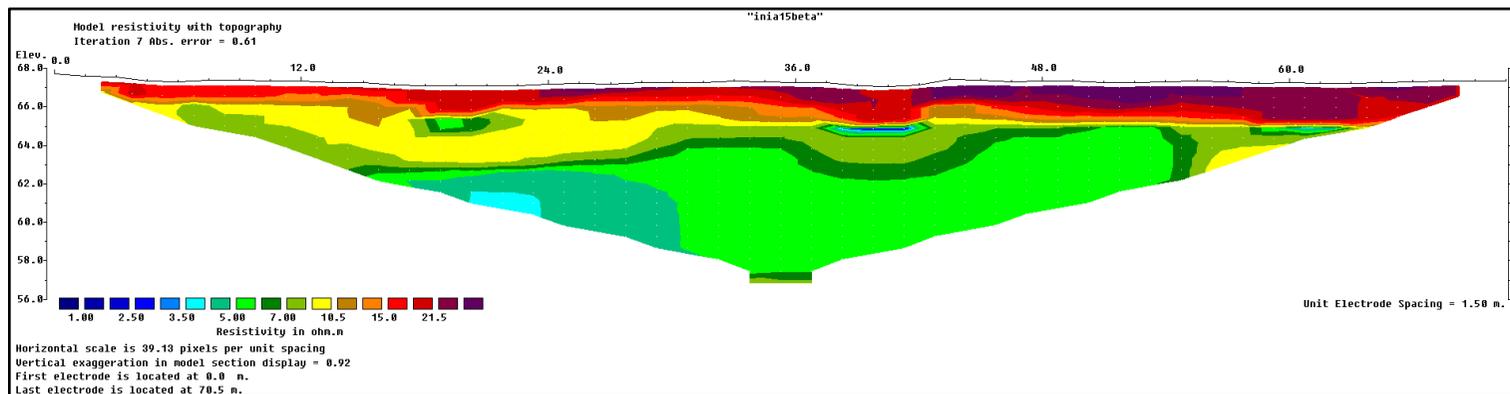


Figura A. 60: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT Sitio Blanco, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

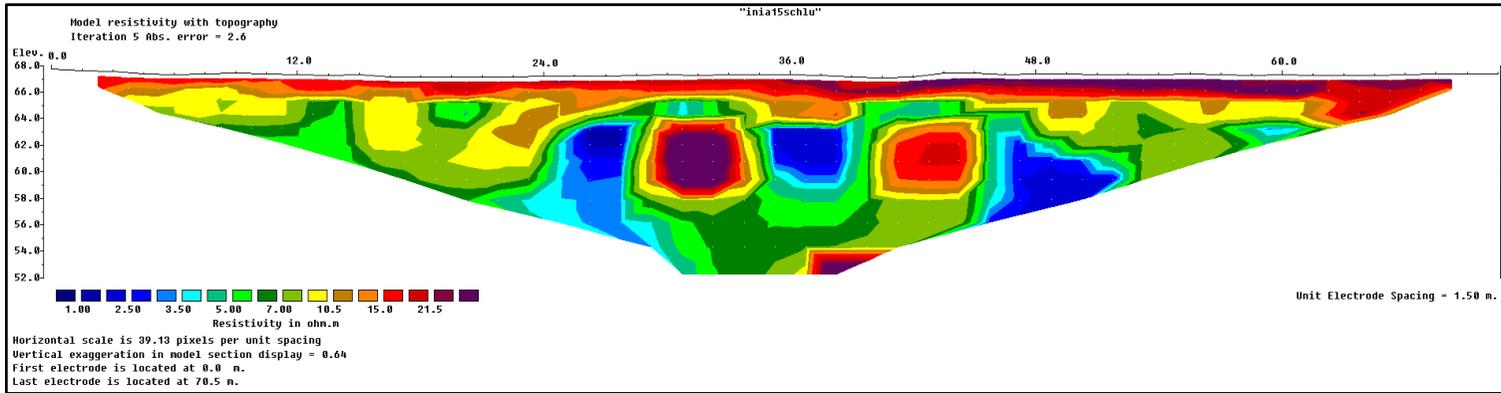


Figura A. 61: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT Sitio Blanco, Sitio 1 utilizando un arreglo Schlumberger.

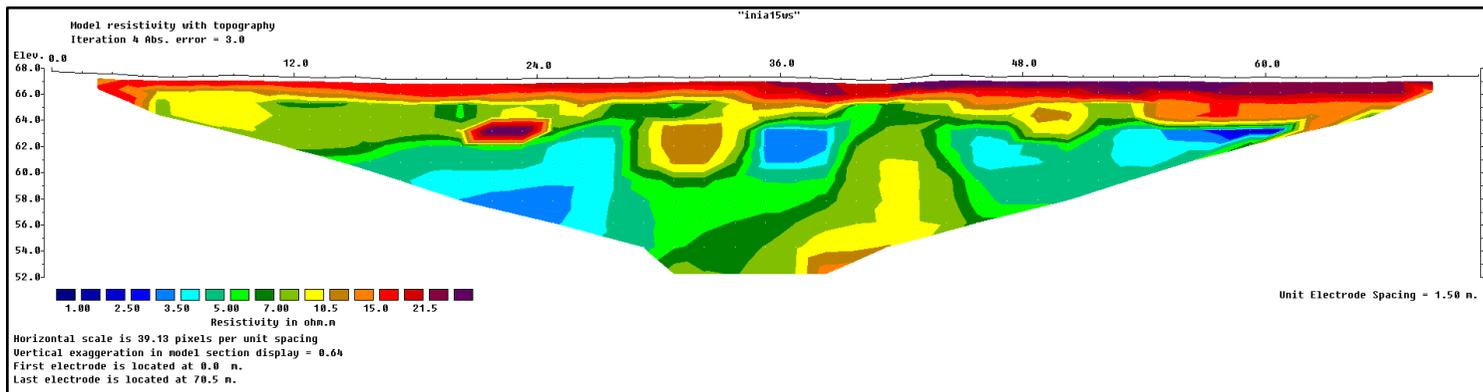


Figura A. 62: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT Sitio Blanco, Sitio 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

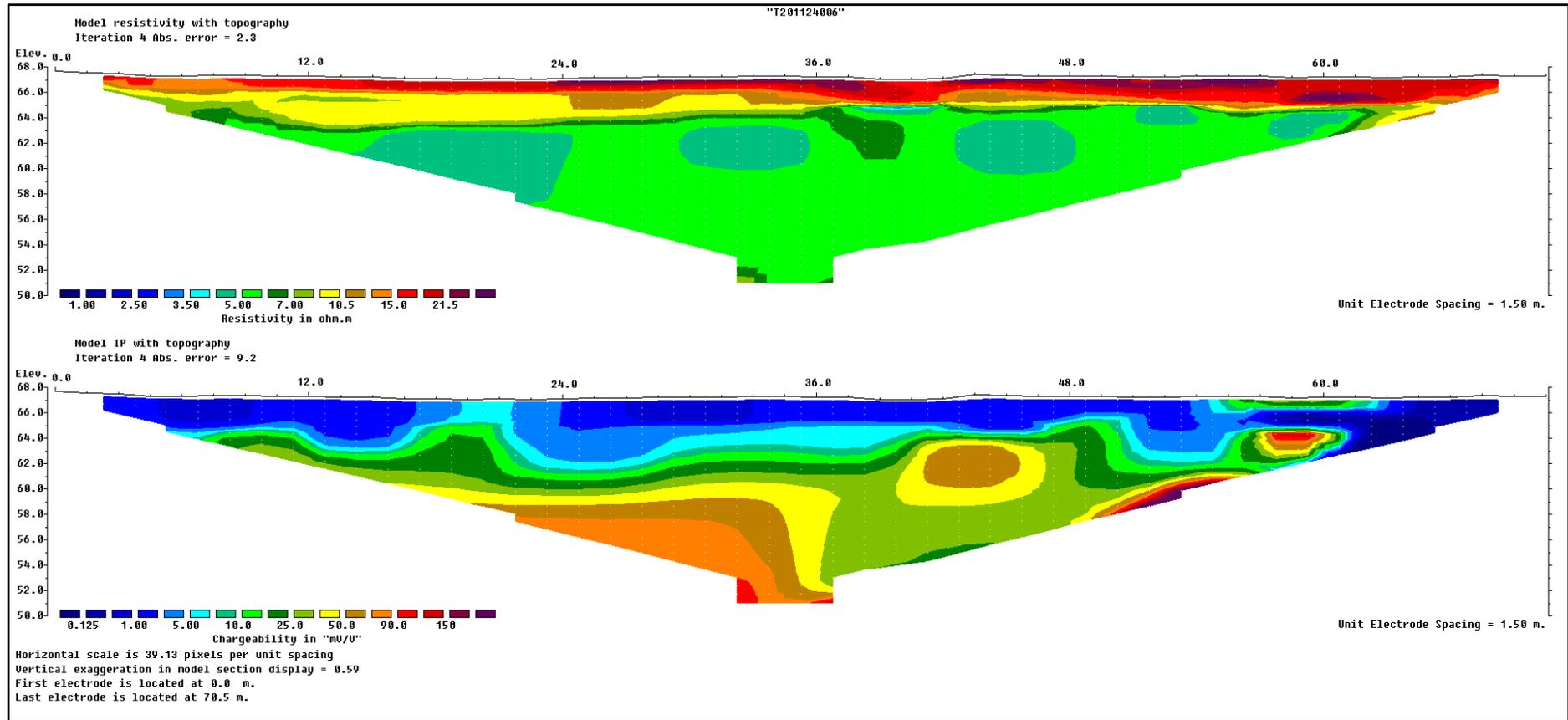


Figura A. 63: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP Sitio Blanco, Sitio 1 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

7.1.2 Sitio 2

7.1.2.1 Zona Lagunas

Perfil 1

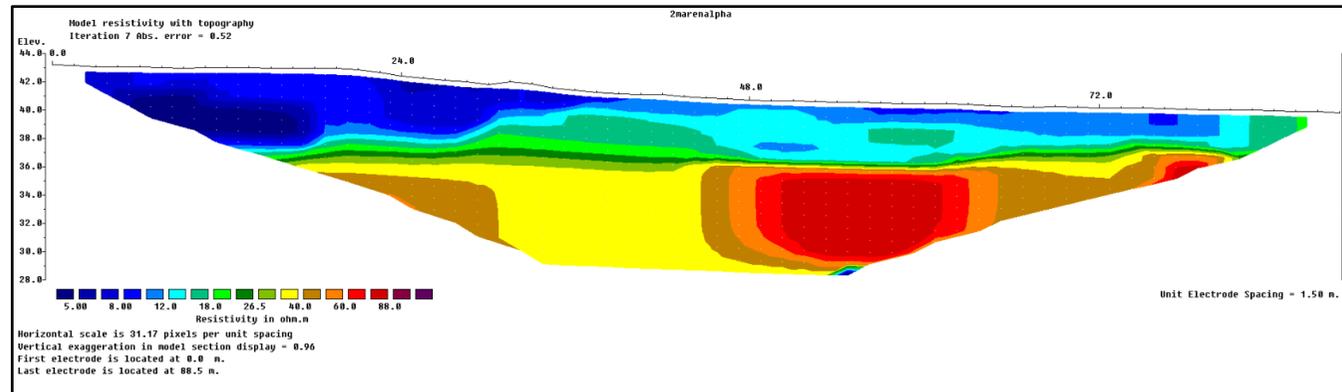


Figura A. 64: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

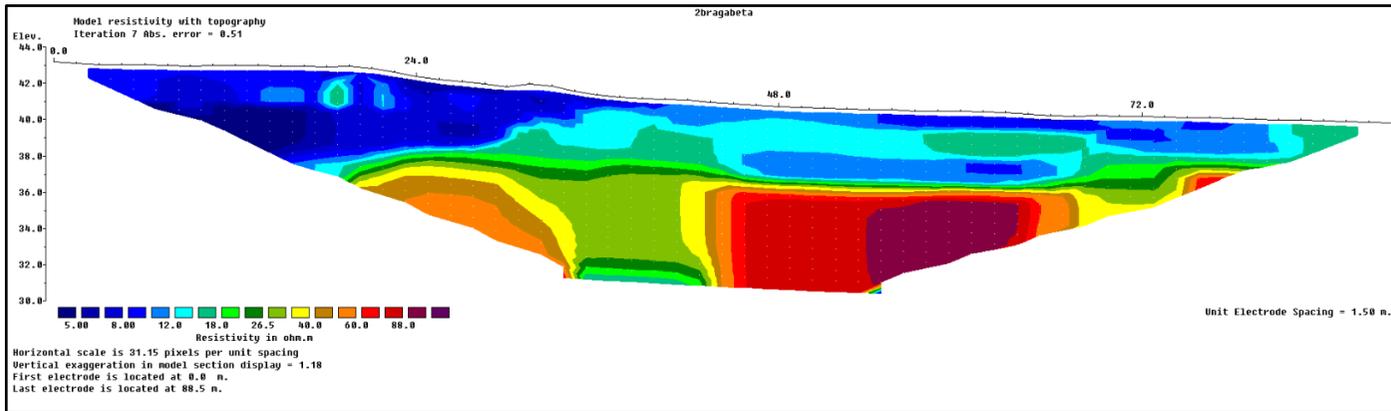


Figura A. 65: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Wenner Beta.

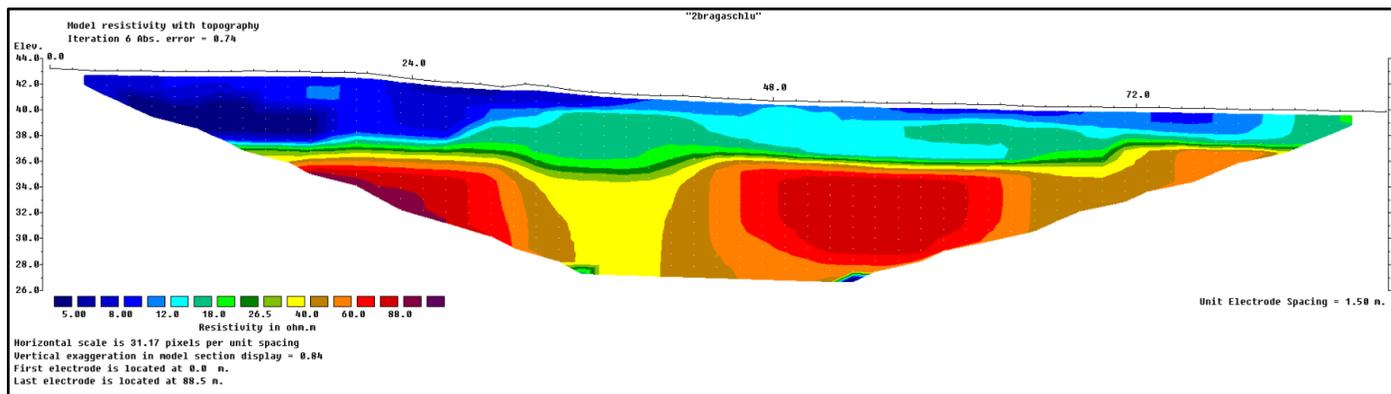


Figura A. 66: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Schlumberger.

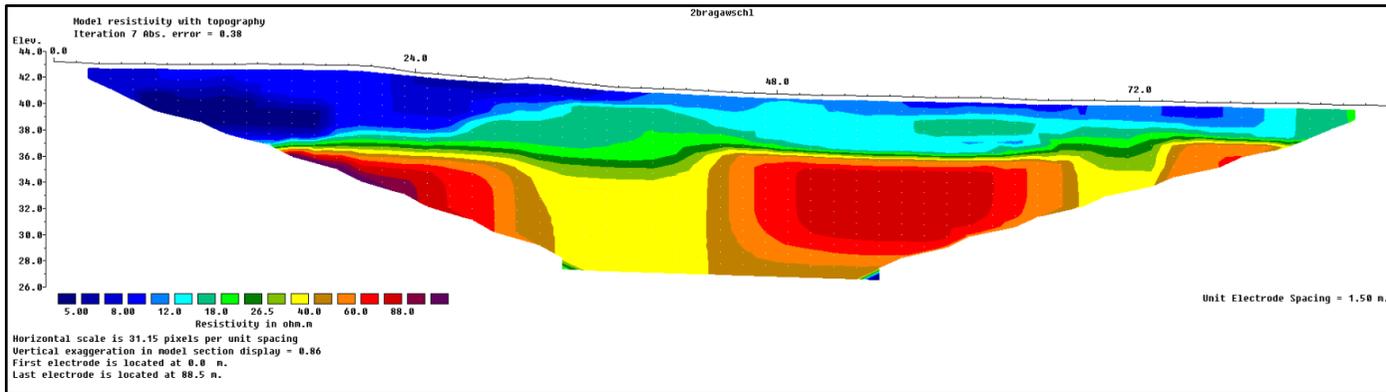


Figura A. 67: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 1 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

Perfil 2

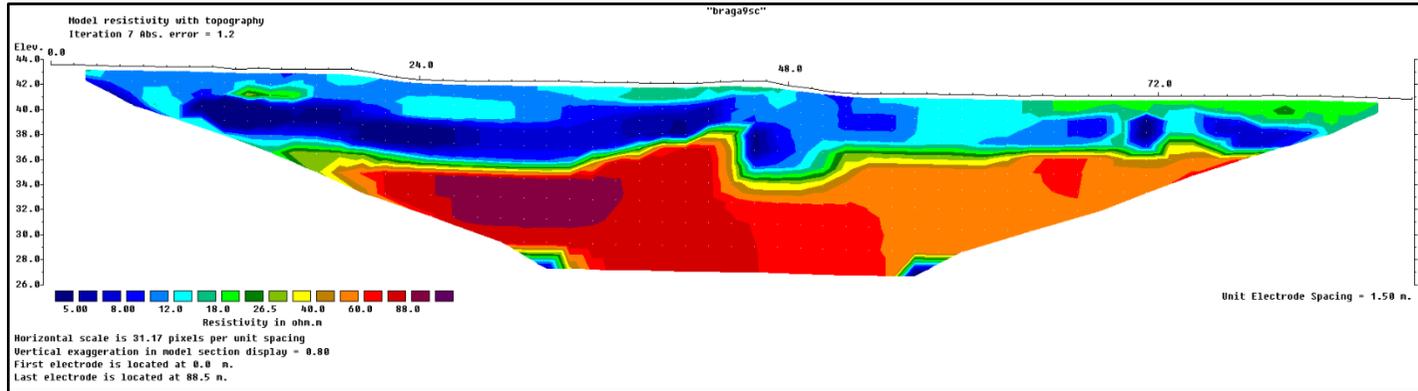


Figura A. 68: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 2 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Schlumberger.

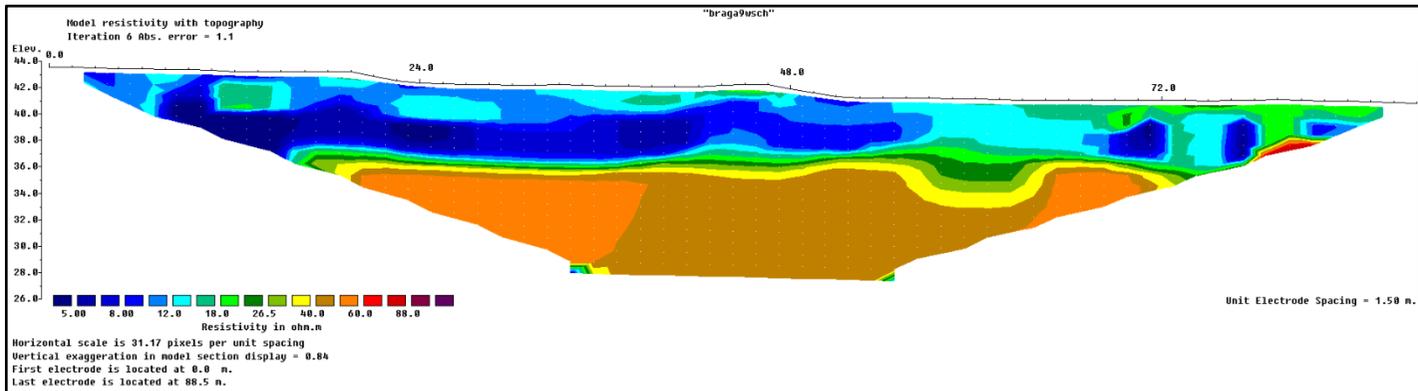


Figura A. 69: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT 2 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

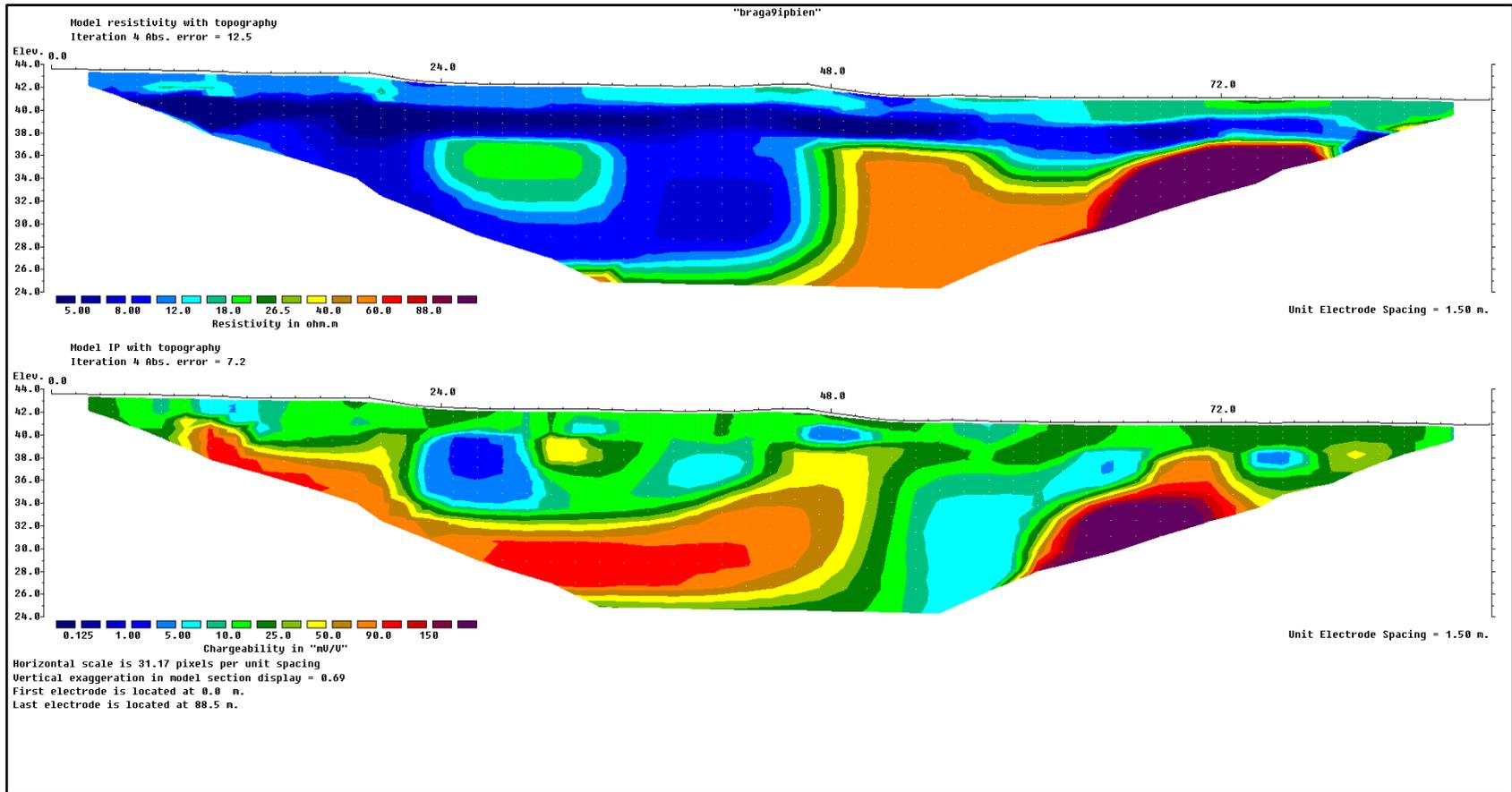


Figura A. 70: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP 2 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

Perfil 3

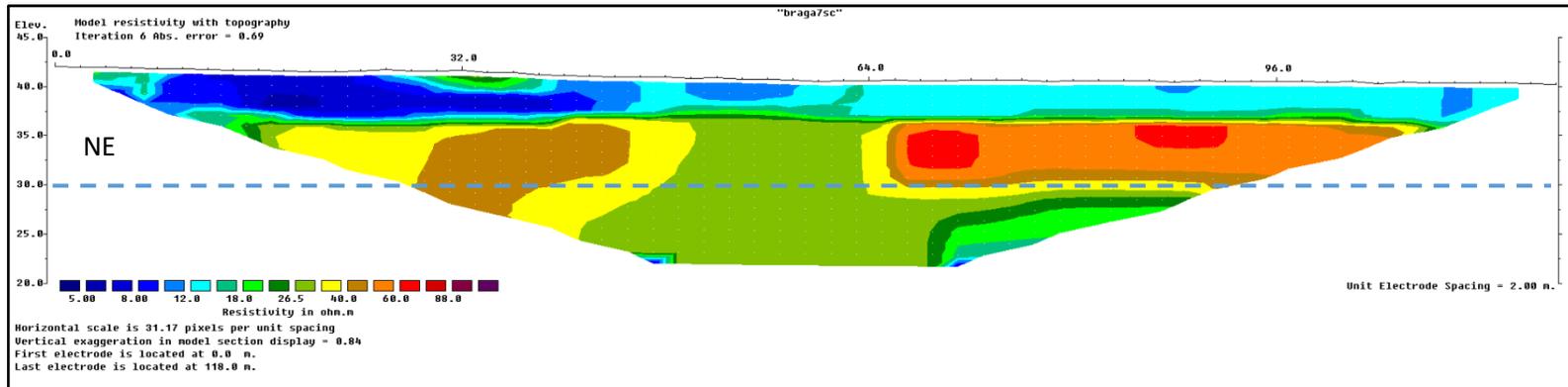


Figura A. 71: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT3 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Schlumberger.

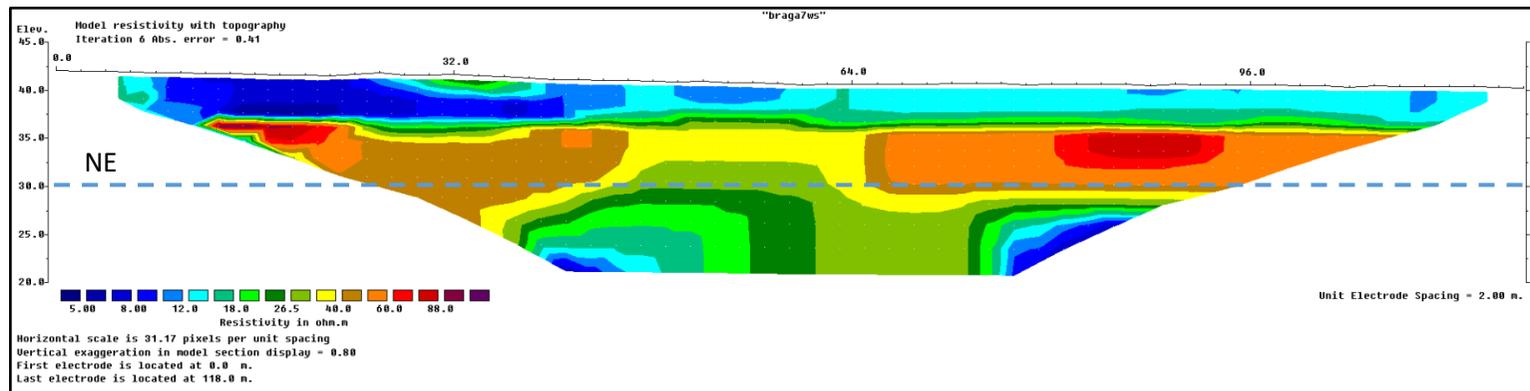


Figura A. 72: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT3 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

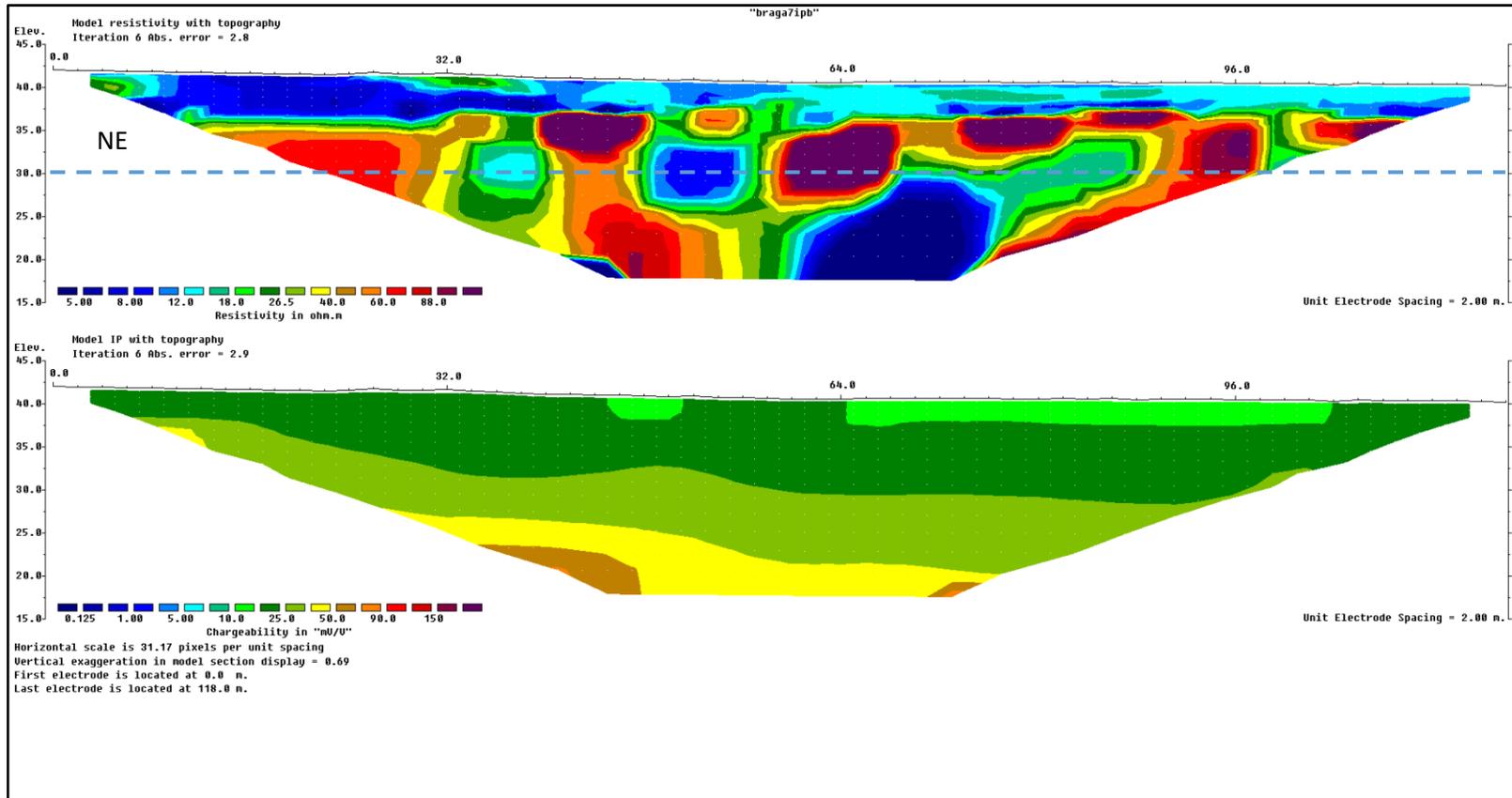


Figura A. 73: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP3 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

Perfil 4

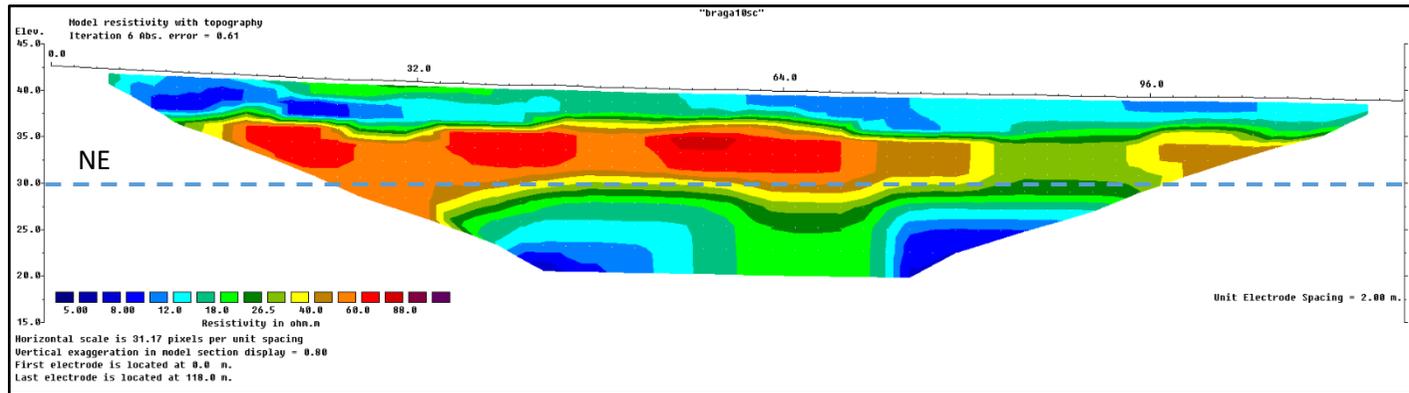


Figura A. 74: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT4 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Schlumberger.

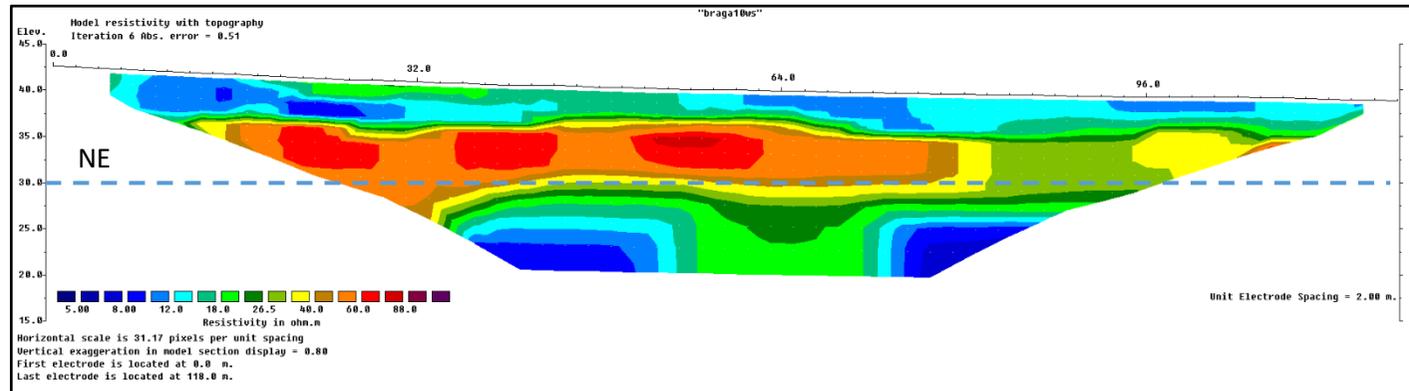


Figura A. 75: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT4 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

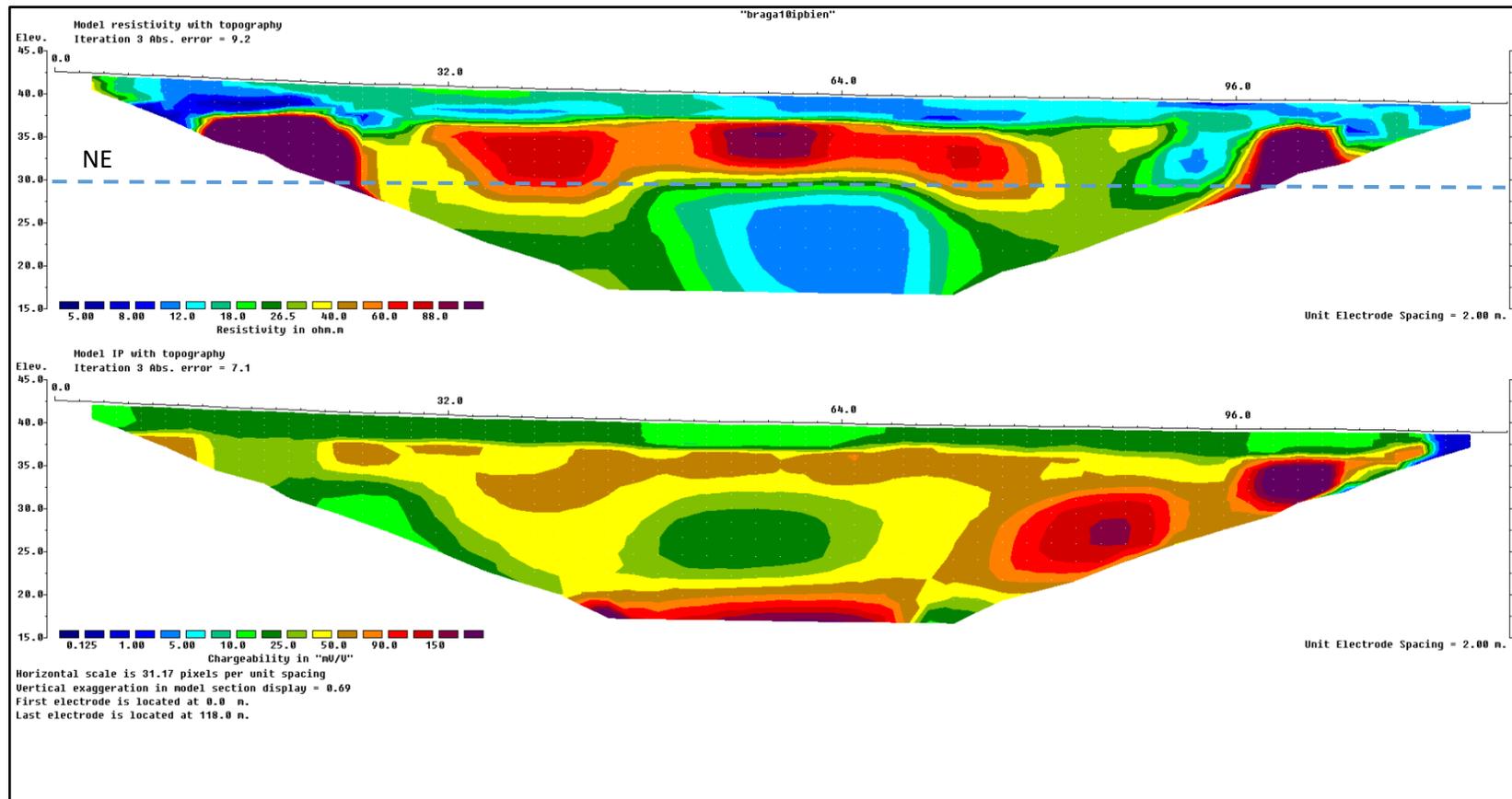


Figura A. 76: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP4 Zona Lagunas, Sitio 2 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

7.1.2.2 Sitio Blanco

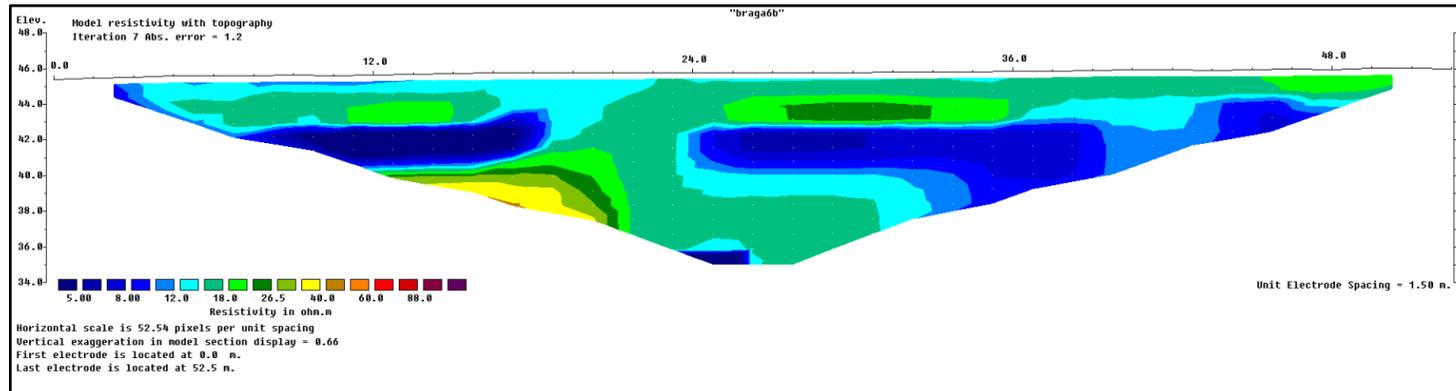


Figura A. 77: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT Sitio Blanco, Sitio 2 utilizando un arreglo Schlumberger.

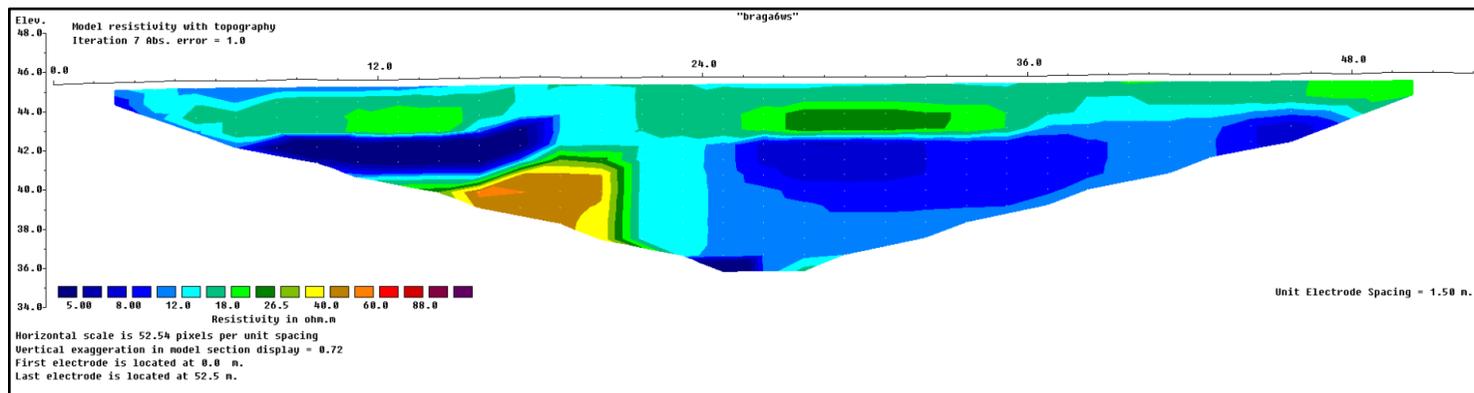


Figura A. 78: Procesamiento de los datos correspondientes a la ERT Sitio Blanco, Sitio 2 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

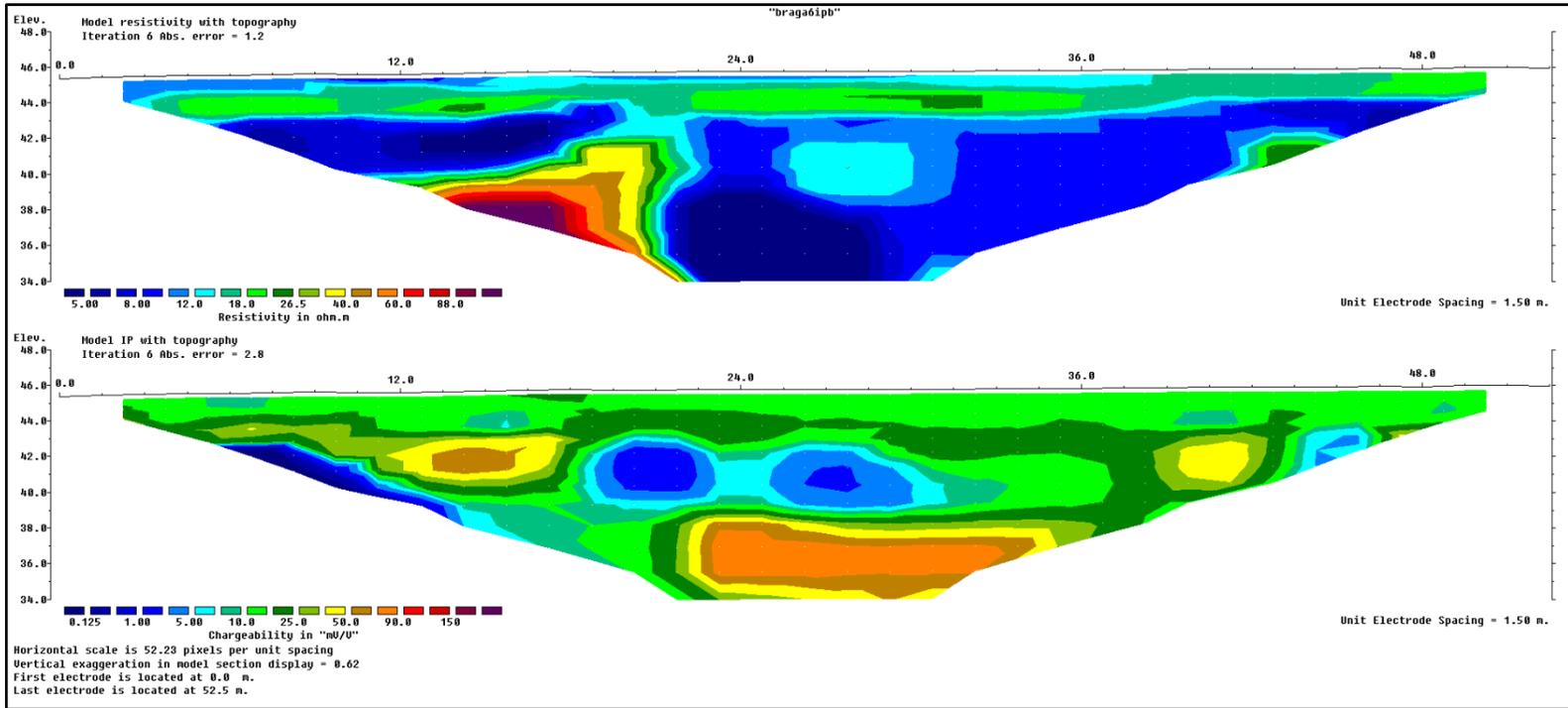


Figura A. 79: Procesamiento de los datos correspondientes a la IP Sitio Blanco, Sitio 2 utilizando un arreglo Dipolo Dipolo.

7.2 Perfiles de perforaciones y relevamientos de Sitio 1 y Sitio 2

En este Anexo se incluyen los perfiles de perforaciones y relevamiento realizados en la zona del Sitio 1 y Sitio 2

Tiempo de Perforación					
Profundidad	Tiempo (min)	Material atravesado	Profundidad	Tiempo (min)	Material atravesado
	De 0 m a 38mtrs 3 horas				
0m a 1m		Suelo vegetal	32m a 33m		
1m a 2m			33m a 34m		
2m a 3m			34m a 35m		
3m a 4m			35m a 36m		
4m a 5m		Sedimento tosca roja	37m a 37m		
5m a 6m			37m a 38m		
6m a 7m			38m a 39m		Basamento cristalino
7m a 8m			39m a 40m		
8m a 9m			40m a 41m		
9m a 10m			41m a 42m		
10m a 11m			43m a 44m		
11m a 12m			44m a 45m		
12m a 13m			45m a 46m		
13m a 14m			46m a 47m		
14m a 15m			47m a 48m		
15m a 16m			48m a 49m		
16m a 17m			49m a 50m		
17m a 18m			50m a 51m		
18m a 19m		Basamento Cristalino	51m a 52m		
19m a 20m			52m a 53m		
20m a 21m			53m a 54m		
21m a 22m		Arcillas pardas	54m a 55m		
22m a 23m			55m a 56m		
23m a 24m			56m a 57m		
24m a 25m			57m a 58m		
25m a 26m			58m a 59m		
26m a 27m			59m a 60m		
27m a 28m		Arena grano intermedio	60m a 61m		
28m a 29m			61m a 62m		
29m a 30m			62m a 63m		
30m a 31m			63m a 64m		
31m a 32m			64m a 65m		

Figura A. 80: Perfil litológico Perforación Sitio 1-INIA. Fuente: empresa perforista

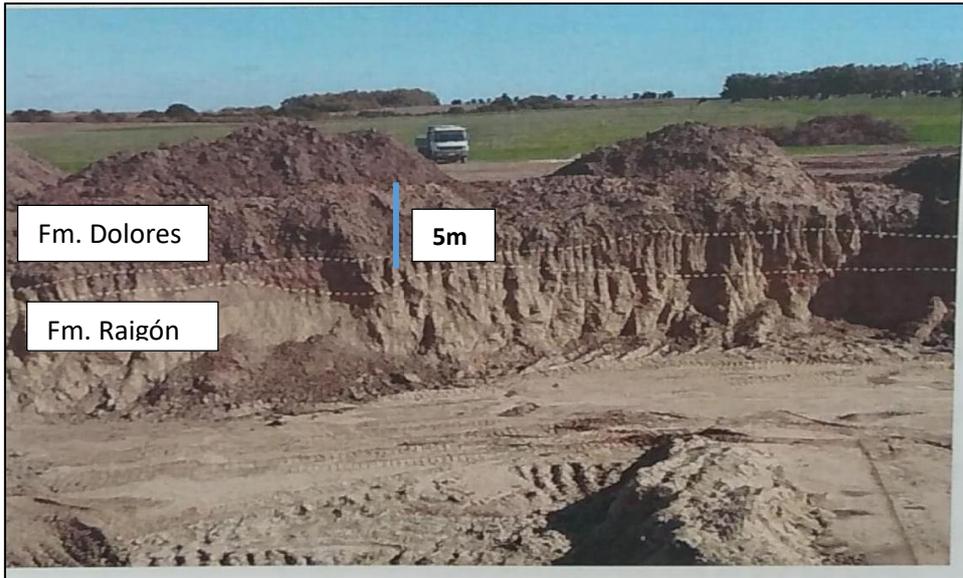


Figura A. 81: Perfil en cantera cercano a sitio 2

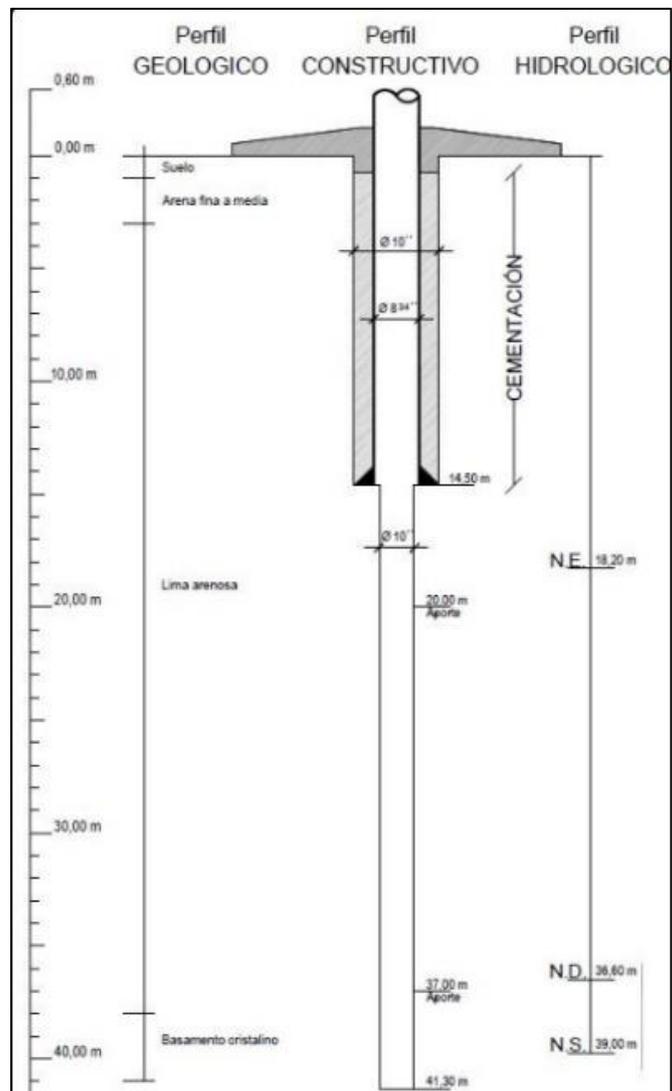


Figura A. 82: Perfil litológico, constructivo e hidrológico perforación cercana a Sitio 2

7.3 Parámetros Físicoquímicos Suelo

En este Anexo se incluye la clasificación granulométrica y los parámetros físicoquímicos realizados a las muestras obtenidas de las perforaciones realizadas en el Sitio 1 (7.3.1) y en el Sitio 2 (7.3.2).

Las técnicas analíticas empleadas por el Laboratorio LAAI para el análisis de las muestras de suelo fueron según el parámetro, Nitratos (ppm N-NO₃) mediante espectrofotometría, Potasio intercambiable (meq K/100g) mediante PR-Kint-FOTV01, Calcio (meq Ca/100g) mediante extracción con acetato de amonio, Magnesio (meq Mg/100g) mediante extracción con acetato de amonio, Sodio intercambiable (meq Na/100g) con fotometría, Fosfato (ppm PO₄) empleando AOAC 958.01, Cloruro (ppm) con método estándar 4500, Carbono Orgánico (%) con el método Walkley-Black, Conductividad Eléctrica (μS/cm) mediante conductimétrico, pH del agua extraída con potenciómetro y Humedad (%) con secado a 105° C hasta peso constante.

7.3.1 Sitio 1

7.3.1.1 Clasificación Granulométrica

Tabla A. 1: Propiedades granulométricas y clasificación según SUCS muestras de suelo Sitio 1. Fuente: Elaboración propia

Profundidad/Sitio									
LA	Clasificación SUCS	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	Descripción
0.5	CH	0	8.7	48.9	42.3	59	28	39	Arcilla alta plasticidad
1	CH	0	4.4	56	39.6	62	24	38	Arcilla alta plasticidad
2	CH	0	1.7	50.6	47.6	76	34	42	Arcilla alta plasticidad
3	CH	0	0.3	45.8	53.9	84	34	50	Arcilla alta plasticidad
4	CH	0	0.4	61.3	38.3	67	31	36	Arcilla alta plasticidad
LG									
0.5	CH	0	3.5	52.4	44.1	62	26	36	Arcilla alta plasticidad
1	CH	0	4.7	62.9	32.4	56	25	21	Arcilla alta plasticidad
2	MH	0.9	10	67.3	21.8	52	28	24	Limo alta plasticidad
3	CH	1.1	3.7	59	36.2	67	38	29	Arcilla alta plasticidad
4	MH	0	0.8	48	51.1	78	37	41	Limo alta plasticidad

Sitio Blanco									
0.5	CL	0	3.7	60.9	35.4	49	22	27	Arcilla baja plasticidad
1	CL	0	3.4	67.6	29	42	24	18	Arcilla baja plasticidad
1.5	CL	0	1.8	74	24.2	39	20	19	Arcilla baja plasticidad

7.3.1.2 Parámetros Químicos

Tabla A. 2: Propiedades químicas muestras de suelo Sitio 1. Fuente: Elaboración propia

Profundidad/Sitio									
LA	Nitrato(mg)	Potasio intercambiable (meq.K/100g)	Calcio (meq.Ca/100g)	Magnesio (meq.Mg/100g)	Sodio intercambiable (meq.NA/100g)	Fosfato (ppm PO4)	Cloruro (ppm)	Carbono Orgánico (%)	Conductividad (μS/cm)
0.5	13.29	6.30	21.30	8.20	3.90	440.00	230.00	1.00	547.00
1	17.71	3.70	24.70	9.30	3.50	527.00	190.00	0.30	670.00
2	8.86	1.58	29.00	11.70	4.30	449.00	285.00	0.20	501.00
3	8.86	1.48	28.70	11.90	5.70	329.00	167.00	0.10	384.00
4	13.29	1.52	25.70	7.90	5.20	531.00	190.00	0.10	313.00
LG									
0.5	13.29	0.77	20.10	7.80	4.10	469.00	215.00	0.90	290.00
1	8.86	0.94	15.60	8.40	4.80	508.00	180.00	0.10	347.00
2	8.86	0.89	25.80	9.30	7.40	422.00	380.00	0.10	640.00
3	8.86	1.04	26.70	9.50	8.30	445.00	155.00	0.10	508.00
4	8.86	1.08	27.90	13.40	7.80	300.00	170.00	0.10	462.00
Sitio Blanco									
0.5									
1	8.86	0.71	17.00	3.90	0.70	450.00	75.00	0.80	138.00
1.5	8.86	1.02	15.60	5.20	0.70	411.00	155.00	0.20	90.00

Tabla A. 3: Propiedades químicas muestras de suelo Sitio 1 (Continuación). Fuente: Elaboración propia

Profundidad/Sitio								
LA	pH agua	Humedad (%)	Bases totales (meq/100g)	(Ca+Mg)/K	Ca/K	Ca/Mg	K/Mg	Mg/K
0.5	8.40	26.90	39.70	4.68	3.38	2.60	0.77	1.30
1	8.50	22.40	41.20	9.19	6.68	2.66	0.40	2.51
2	8.60	25.00	46.60	25.76	18.35	2.48	0.14	7.41
3	8.70	28.50	47.80	27.43	19.39	2.41	0.12	8.04
4	8.60	25.90	40.30	22.11	16.91	3.25	0.19	5.20
LG								
0.5	7.80	22.90	32.80	36.23	26.10	2.58	0.10	10.13
1	8.50	20.10	29.70	25.53	16.60	1.86	0.11	8.94
2	8.60	22.60	43.40	39.44	28.99	2.77	0.10	10.45
3	8.80	23.00	45.50	34.81	25.67	2.81	0.11	9.13
4	8.60	21.90	50.20	38.24	25.83	2.08	0.08	12.41
Sitio Blanco								
0.5								
1	6.40	20.30	22.30	29.44	23.94	4.36	0.18	5.49
1.5	7.00	15.60	22.50	20.39	15.29	3.00	0.20	5.10

7.3.2 Sitio 2

7.3.2.1 Clasificación Granulométrica

Tabla A. 4: Propiedades granulométricas y clasificación según SUCS muestras de suelo Sitio 2. Fuente: Elaboración propia

Profundidad/Sitio									
Lagunas	Clasificación SUCS	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	Descripción
0.5	CH	0	21.3	32.4	46.4	50	17	33	Arcilla alta plasticidad
1	CL	0.1	22.0	48.4	29.5	36	19	17	Arcilla
2	CL	0	36.0	30.3	33.7	35	16	19	Arcilla
3	CL	0.1	40.3	32.7	26.9	37	17	20	Arcilla
4	SM	2.4	55.6	15.3	26.7	38	25	13	Arena limosa
5	SM	1.3	86.2	5.7	6.7	-			Arena limosa
Sitio Blanco									
0.5	CH	0.3	19.6	34.2	45.9	52	23	19	Arcilla alta plasticidad
1	CL	0.1	20.2	39.8	39.8	35	17	18	Arcilla
2	CL	0.1	22.2	38.4	39.3	33	17	16	Arcilla
3	SM	0	64,6	9.5	25.8	-	-	-	Arena limosa
4	SM	0.4	79.6	3.4	16.6	-	-	-	Arena limosa

7.3.2.2 Parámetros Químicos

Tabla A. 5: Propiedades químicas muestras de suelo Sitio 2. Fuente: Elaboración propia

Profundidad/Sitio									
Lagunas	Nitrato(mg)	Potasio intercambiable (mg.K/100g)	Calcio (meq.Ca/100g)	Magnesio (meq.Mg/100g)	Sodio intercambiable (meq.NA/100g)	Fosfato (ppm PO4)	Cloruro (ppm)	Carbono Orgánico (%)	Conductividad (µS/cm)
0.5	8.86	20.67	29.4	3.9	1.6	383	0	0.6	241
1	8.86	21.45	22.2	3.6	1.8	285	27	0.1	265
2	4.43	17.16	21	3.5	1.7	178	36	0	245
3	4.43	15.99	20.8	4	1.7	141	0	0	212
4	13.29	12.09	14.9	3.2	1.2	221	27	0	145
5	22.14	7.41	8.2	2.6	0.7	534	250	0	111
Sitio Blanco									
0.5	13.29	20.67	27.5	3.9	4.1	337	45	0.5	327
1	8.86	25.74	19.3	3.8	4.8	343	130	0.1	450
2	4.43	29.64	11.7	3.3	4.3	1625	250	0	384
3	8.9	17.55	10.9	2.4	1.7	1150	117	0	265
4	8.9	19.5	10.1	3.2	1.6	356	108	0	204

Tabla A. 6: Propiedades químicas muestras de suelo Sitio 2 (Continuación). Fuente: Elaboración propia

Profundidad/Sitio								
Lagunas	pH agua	Humedad (%)	Bases totales (meq/100g)	(Ca+Mg)/K	Ca/K	Ca/Mg	K/Mg	Mg/K
0.5	7.7	18.1	35.4	62.83	55.47	7.54	0.14	7.36
1	7.7	11.3	28.2	46.91	40.36	6.17	0.15	6.55
2	8	11.6	26.6	55.68	47.73	6	0.13	7.95
3	8	11.5	26.9	60.49	50.73	5.2	0.1	9.76
4	7.6	8.9	19.6	58.39	48.06	4.66	0.07	10.32
5	6.9	6.2	11.7	56.84	43.16	3.15	0.14	13.68
Sitio Blanco								
0.5	8.3	16.4	36	59.25	51.89	7.05	0.14	7.36
1	8.2	10.6	28.6	35	29.24	5.08	0.17	5.76
2	7.6	11.1	20.1	19.74	15.39	3.55	0.23	4.34
3	7.3	8.8	15.9	29.56	24.22	4.54	0.19	5.33
4	6.9	7.8	15.2	26.6	20.2	3.16	0.16	6.4

7.4 Parámetros Físicoquímicos de efluente en lagunas del Sitio 1 y Sitio 2

En este Anexo se incluyen los parámetros físicoquímicos realizados a las muestras obtenidas del efluente de las lagunas que se encuentran en el Sitio 1 (7.4.1) y en el Sitio 2 (7.4.2). También se incluyen gráficos de barras para visualizar de mejor manera los parámetros físicoquímicos entre los sitios evaluados (Figura A. 83 Figura A. 84 Figura A. 85).

Las técnicas analíticas empleadas según el parámetro analizado fueron: Nitrato (mg N-NO₃/l) con adaptación del método estándar 4500, Nitrógeno Amoniacal (mg/l N-NH₃) mediante 4003UY-DINAMA, Nitrógeno total (mg/l) mediante 4090UY-DINAMA, Calcio (mg/l) empleando 3107UY-DINAMA, Alcalinidad (mg/l) mediante 1002UY-DINAMA, Fosfato (mg P-PO₄/l) mediante APHA/método estándar 4500-P, Magnesio (mg/l) mediante 3139UY-DINAMA, Potasio (mg/l) mediante 3147UY-DINAMA, Sodio (mg/l) mediante 3149UY-DINAMA, Sulfato (mg/l) APHA/método estándar 4500-SO₄-C, Cloruro (mg/l Cl) con APHA/método estándar 4500-Cl, Carbono Orgánico (%), Conductividad (μS/cm) mediante SMEWW2510B.

7.4.1 Sitio 1

Tabla A. 7: Parámetros Físicoquímicos de muestras de efluente Sitio 1

Parámetro/Sitio	LA-Sitio 1	LG-Sitio 1
Nitrato (mg N-NO ₃ /l)	<2.5	<2.5
Nitrógeno amoniacal (mg/l N-NH ₃)	265	115
Nitrógeno total (NTK) (mg/l)	300.1	151.7
Calcio (mg/l)	174.8	117.8
Fosfato (mg P-PO ₄ /l)	14.5	5.8
Magnesio (mg/l)	77.9	15.6
Potasio (mg/l)	332	115
Sodio (mg/l)	275	80
Sulfato (mg/l)	7	<5
Cloruro (mg/l Cl)	385	170
Carbono Orgánico (mg/l)	1600	600
Alcalinidad (mg/l)	1896	1134
Conductividad (μS/cm)	4140	2350

7.4.2 Sitio 2

Tabla A. 8: Parámetros Físicoquímicos de muestra de efluente Sitio 2

Parámetro/Sitio	Laguna 2-Sitio 2
Nitrato (mg N-NO ₃ /l)	ND
Nitrógeno amoniacal (mg/l N-NH ₃)	170
Nitrógeno total (NTK) (mg/l)	181
Calcio (mg/l)	136
Fosfato (mg P-PO ₄ /l)	93
Magnesio (mg/l)	101
Potasio (mg/l)	309
Sodio (mg/l)	255
Sulfato (mg/l)	4.7
Cloruro (mg/l Cl)	245
Carbono Orgánico (mg/l)	313
Alcalinidad (mg/l)	1476

Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

4230

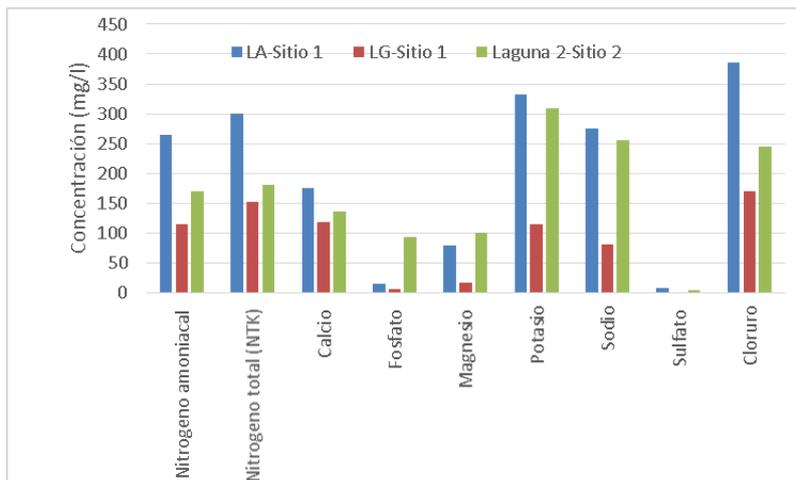


Figura A. 83: Parámetros químicos efluente Lagunas Sitio 1 y Sitio 1.

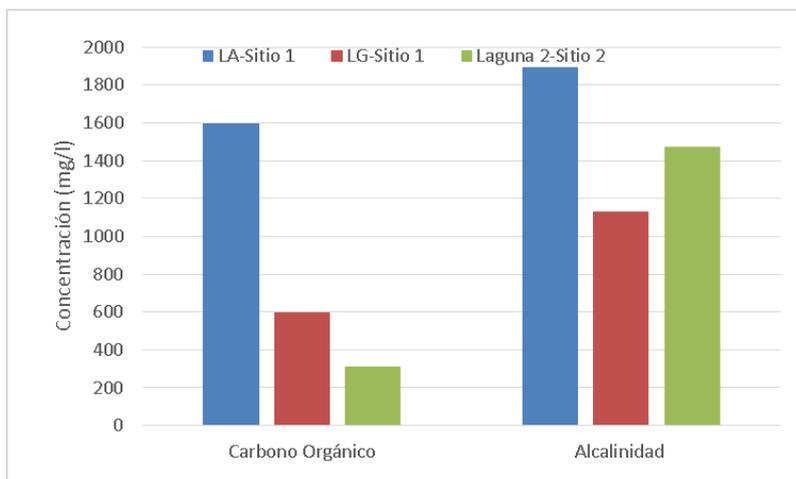


Figura A. 84: Parámetros químicos efluente Lagunas Sitio 1 y Sitio 1 (continuación).

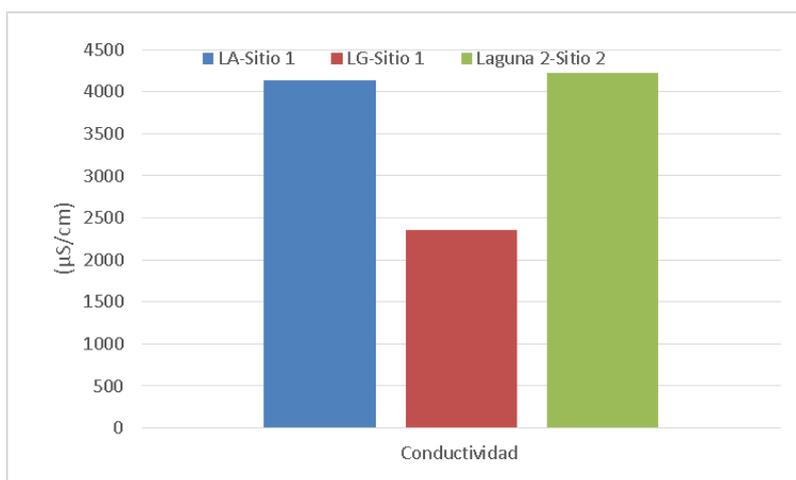


Figura A. 85: Conductividad efluente Lagunas Sitio 1 y Sitio 1.

7.5 Parámetros Físicoquímicos de agua subterránea del Sitio 1 y Sitio 2

En este Anexo se incluyen los parámetros físicoquímicos realizados a las muestras obtenidas del agua subterránea de las perforaciones que se encuentran en el Sitio 1 (7.5.1) y en el Sitio 2 (7.5.2).

Las técnicas analíticas empleadas según el parámetro analizado fueron: pH con electrodo THERMO, STS (mg/l) determinado a 105°C y sólidos volátiles a 555°C por gravimetría, MOS (mg/l), Alcalinidad (mg CaCO₃/l) mediante potenciómetro, Fluoruro (mg/l), Cloruro (mg/l), Bromuro (mg/l), Nitrato (mg/l), Fosfato (mg/l), Sulfato (mg/l), Bicarbonato (mg/l), Carbonato (mg/l), Dureza total (mg/l) mediante titulación con EDTA, Calcio (mg/l), Magnesio (mg/l), Sodio (mg/l) con electrodo de ion selectivo HACH HQ30D, Potasio (mg/l) con espectroscopia de absorción atómica. Para los aniones se empleó cromatografía iónica con supresión química de la conductividad del eluyente en cromatógrafo DIONEX. In situ se midieron pH, Conductividad eléctrica (µS/cm) y Temperatura (°C) con una sonda multiparamétrica Hanna Combo.

7.5.1 Sitio 1

Tabla A. 9: Parámetros físicoquímicos agua subterránea Pozo Sitio 1

Parámetro/Sitio	Pozo Sitio 1
Temperatura (°C)	18
pH	7
CE (µS/cm)	1200
Calcio (mg/l)	54
Magnesio (mg/l)	35.3
Sodio (mg/l)	114
Potasio (mg/l)	54.6
Cloruro (mg/l Cl)	42.58
Sulfato (mg/l)	36.7
Flúor (mg/l)	0.45
Nitratos (mg/l)	25.6
Bicarbonatos (mg/l)	506.8

7.5.2 Sitio 2

Tabla A. 10: Parámetros físicoquímicos agua subterránea pozos Sitio 2

Parámetro/Sitio	Pozo Abastecimiento Sitio 2	Pozo Brocal Sitio 2
Temperatura (°C)	19.4	19.7
pH	7.18	7
CE (µS/cm)	1177	1359
Calcio (mg/l)	77.4	143
Magnesio (mg/l)	13.3	48.9
Sodio (mg/l)	215	219
Potasio (mg/l)	0	0
Cloruro (mg/l Cl)	115.9	133.76
Sulfato (mg/l)	78.35	240
Fluor (mg/l)	0.31	0.16
Nitratos (mg/l)	78.8	95.6
Bicarbonatos (mg/l)	462.8	593.5

7.6 Correlación Geofísica-Parámetros Físicoquímicos

En esta sección se muestran las correlaciones obtenidas entre los parámetros fisicoquímicos y parámetros geofísicos resistividad o cargabilidad para el Sitio 1 (7.6.1) y Sitio2 (7.6.2) que no se han incluido en el informe.

7.6.1 Sitio 1

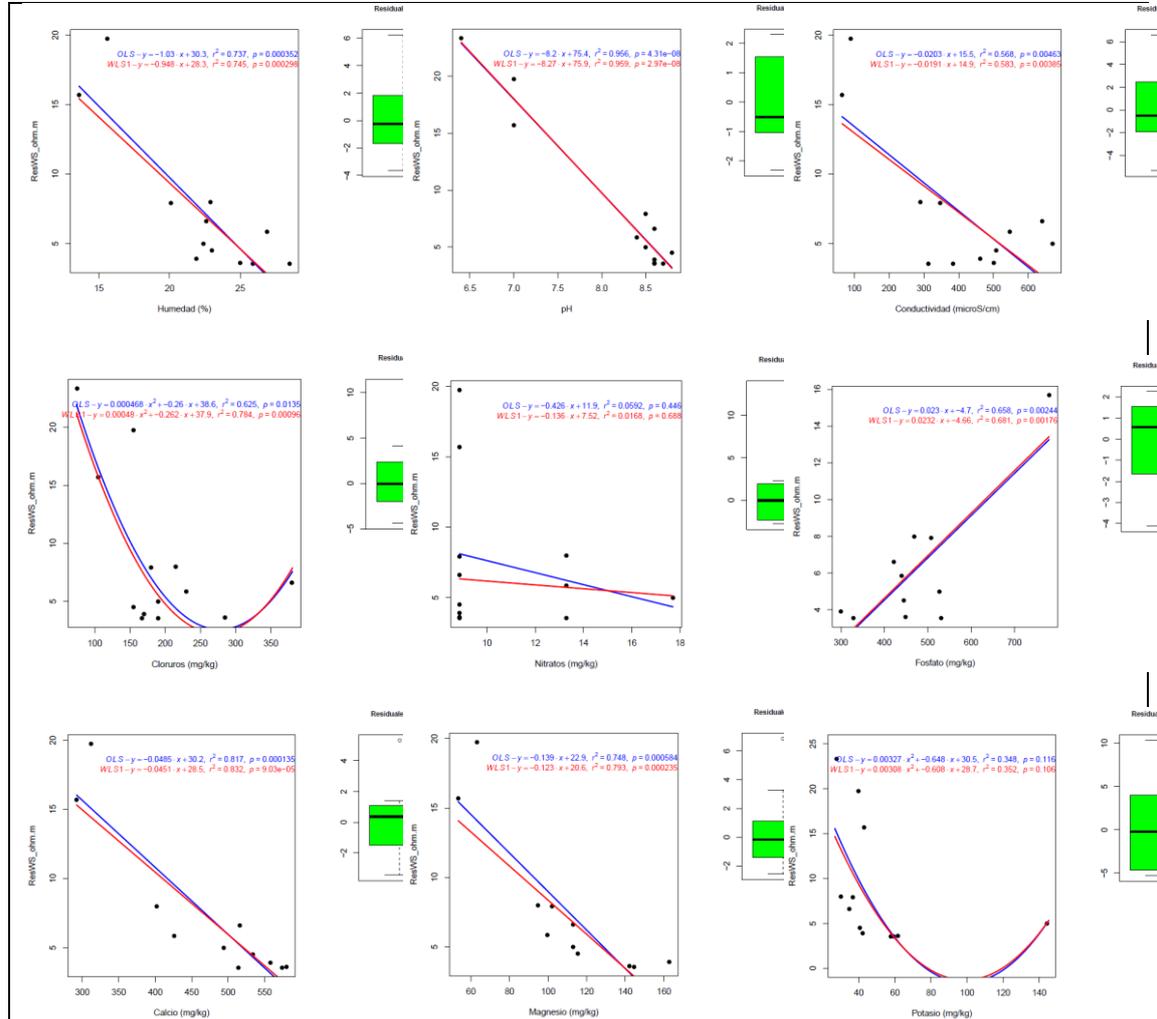
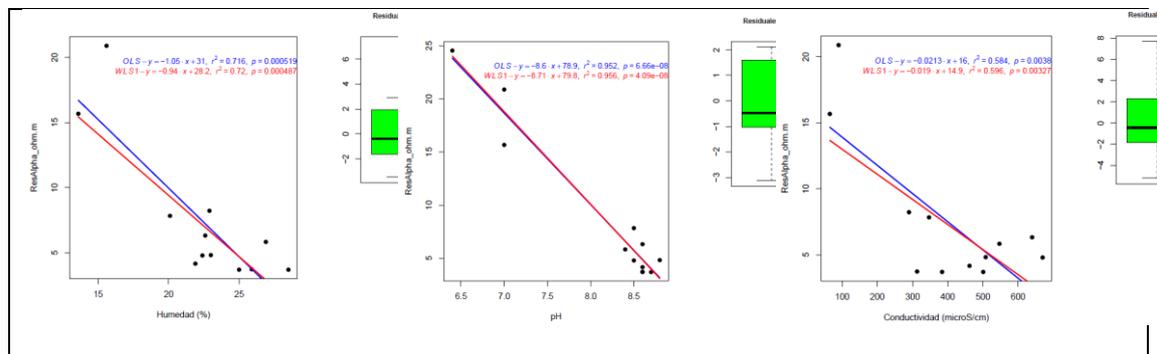


Figura A. 86: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad Sitio 1 mediante arreglo Wenner Schlumberger. OLS (azul), WLS (rojo).



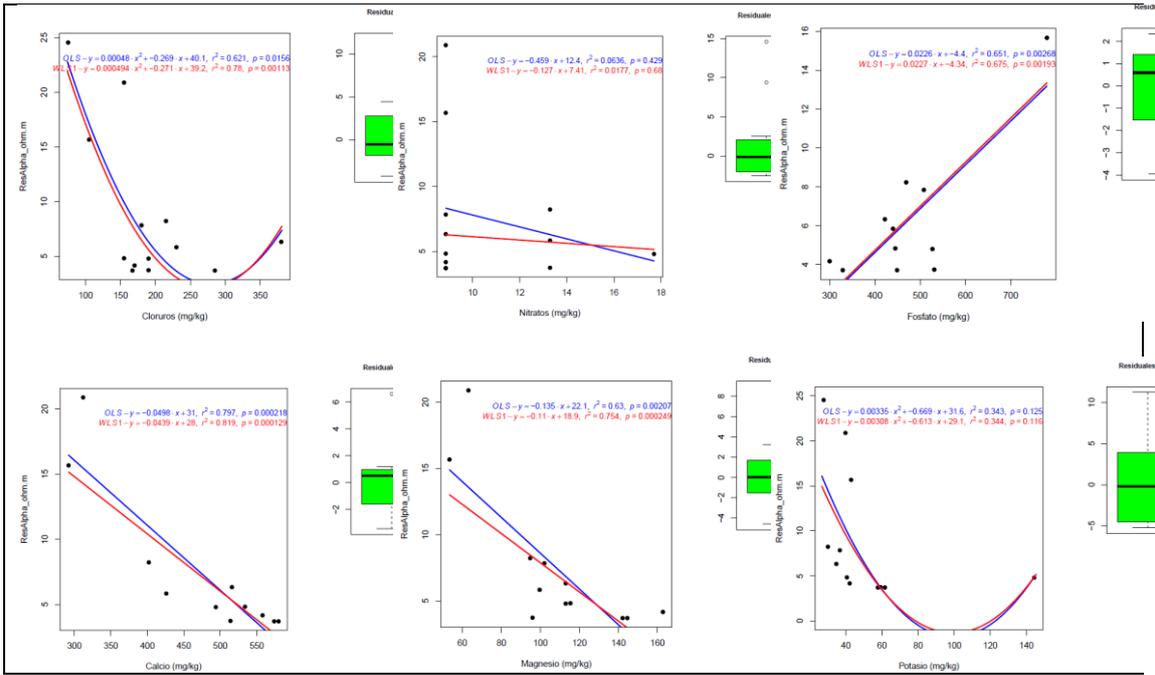


Figura A. 87: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad Sitio 1 mediante arreglo Wenner Alpha. OLS (azul), WLS (rojo).

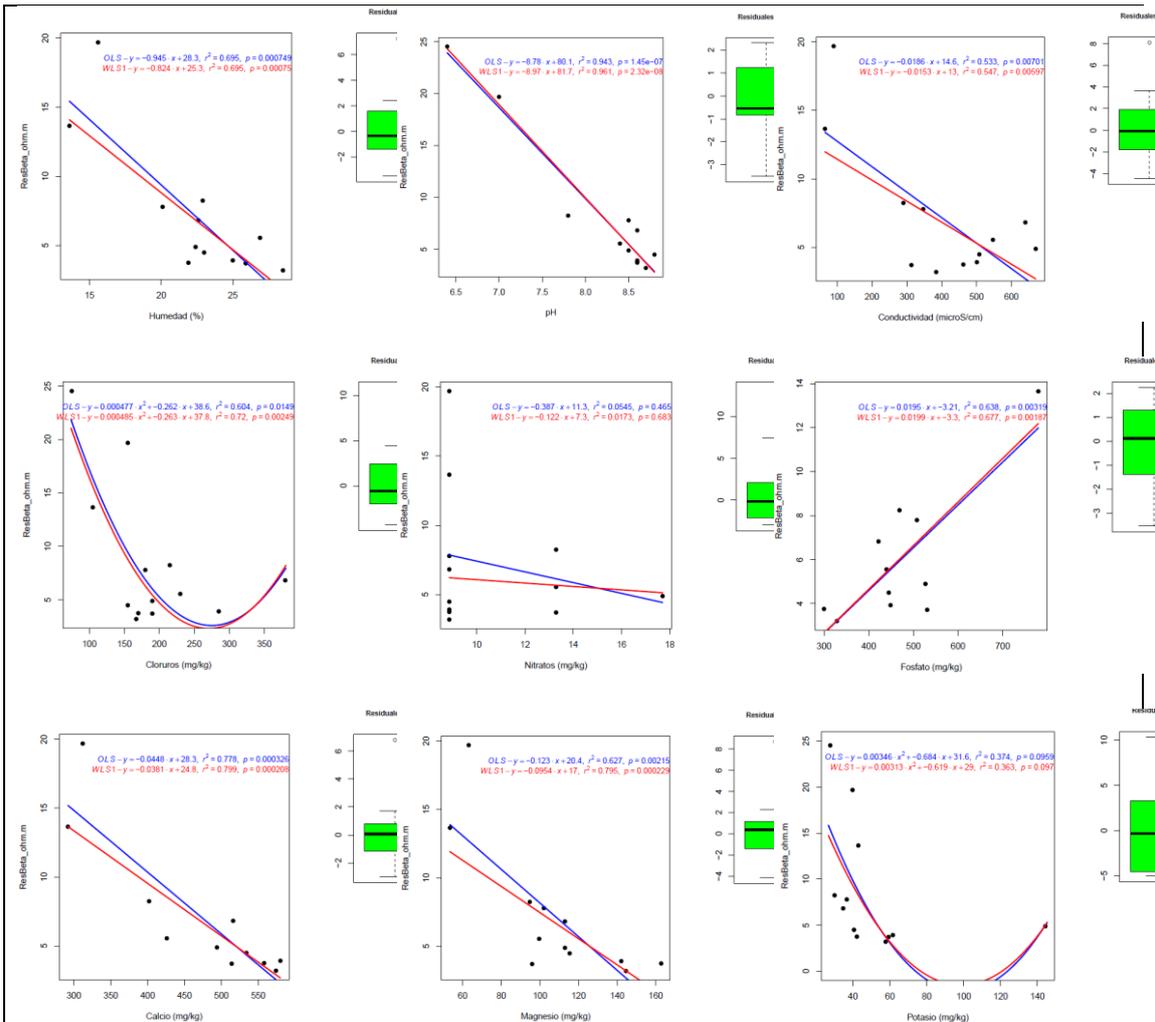


Figura A. 88: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad Sitio 1 mediante arreglo Wenner Beta. OLS (azul), WLS (rojo).

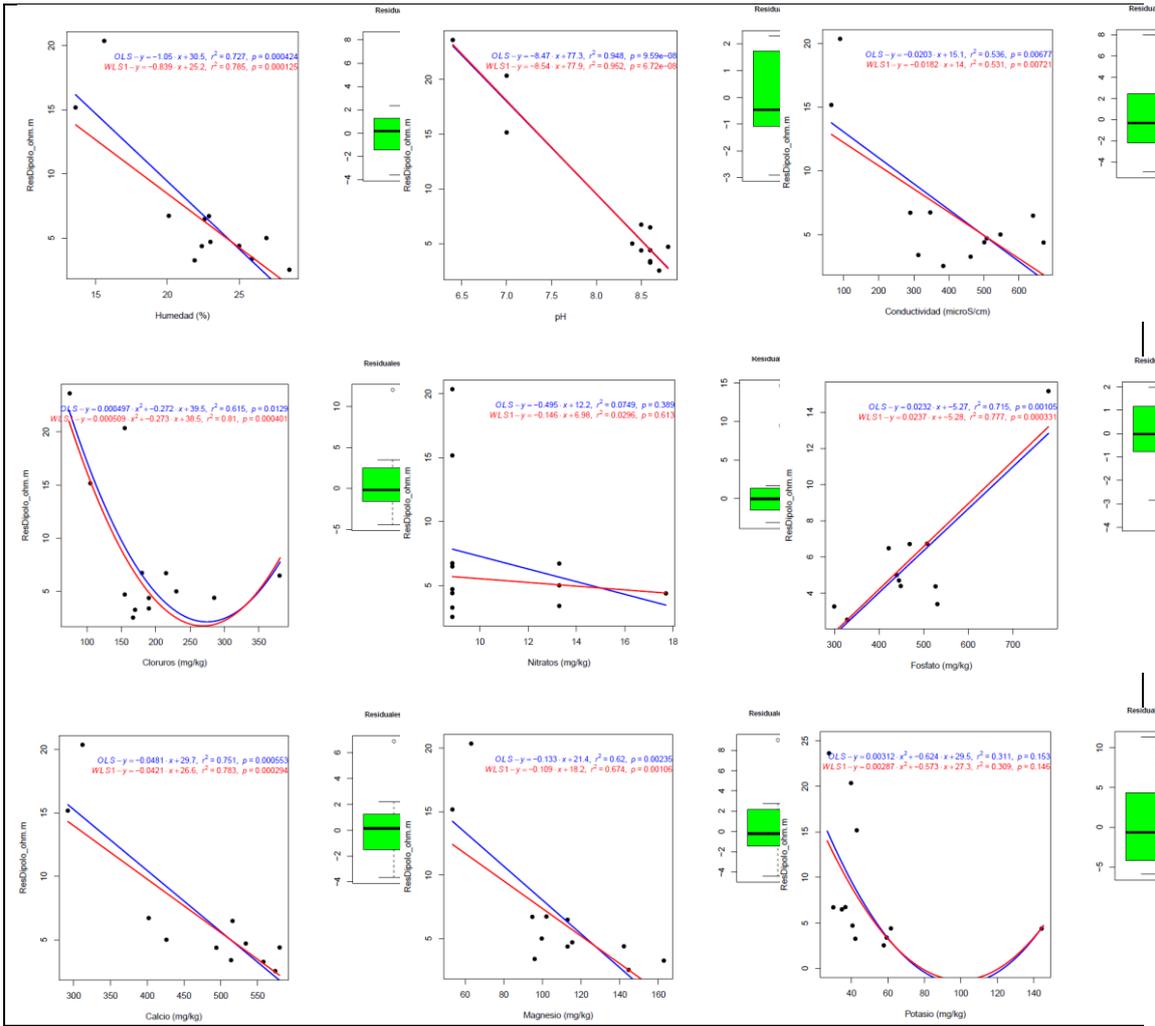
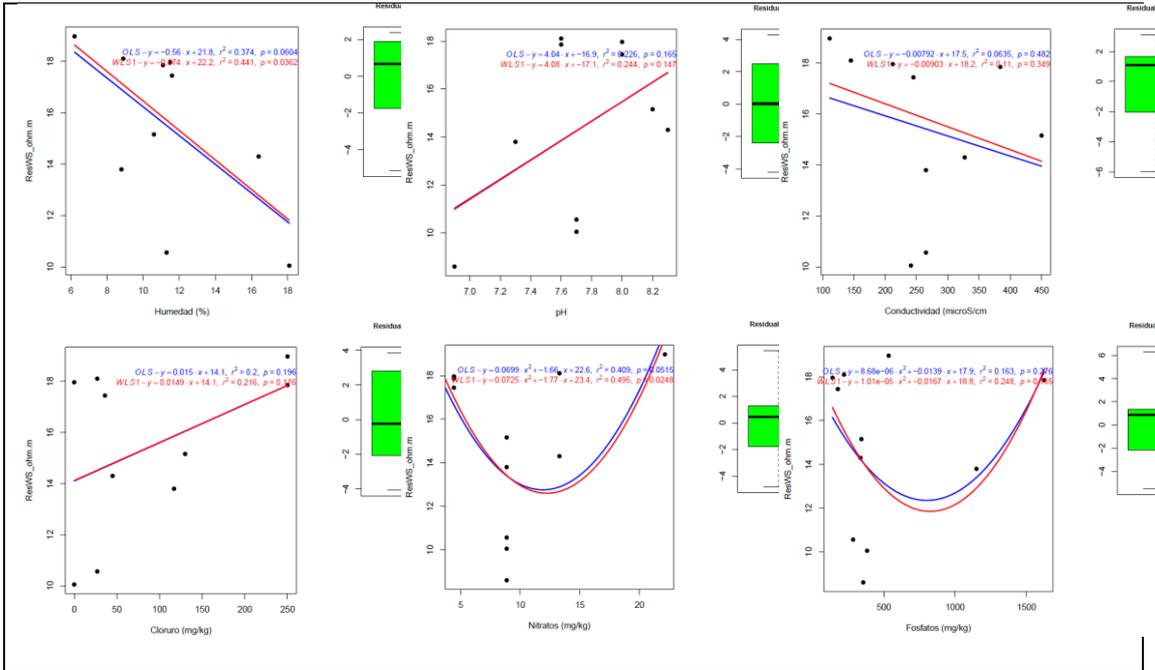


Figura A. 89: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad Sitio 1 mediante arreglo Dipolo Dipolo. OLS (azul), WLS (rojo).

7.6.2 Sitio 2



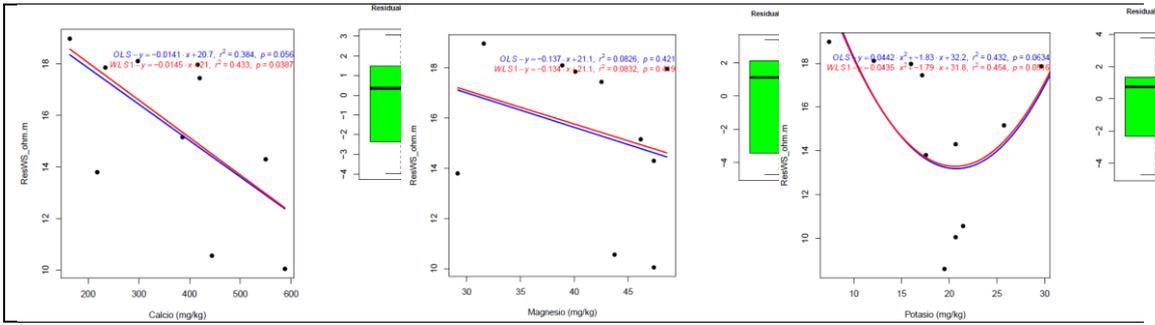


Figura A. 90: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad Sitio 2 mediante arreglo Wenner Schlumberger. OLS (azul), WLS (rojo).

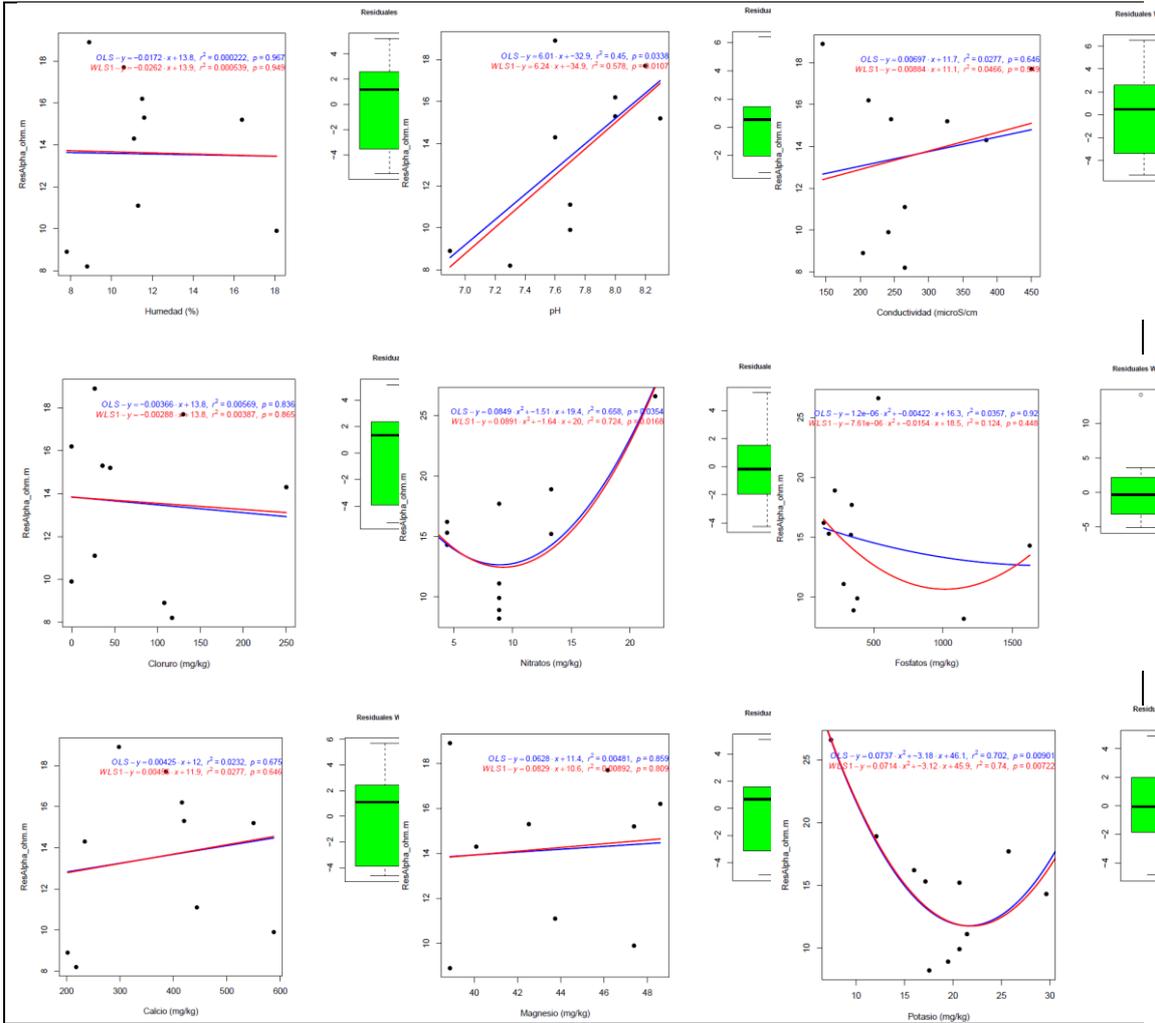
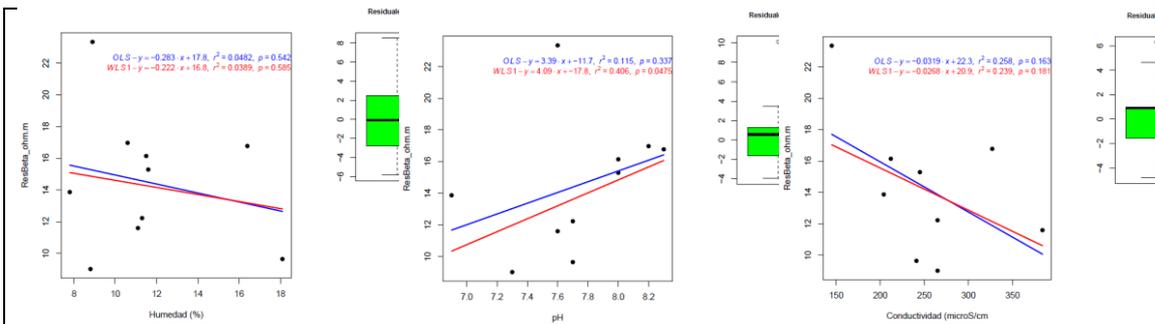


Figura A. 91: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad Sitio 2 mediante arreglo Wenner Alpha. OLS (azul), WLS (rojo).



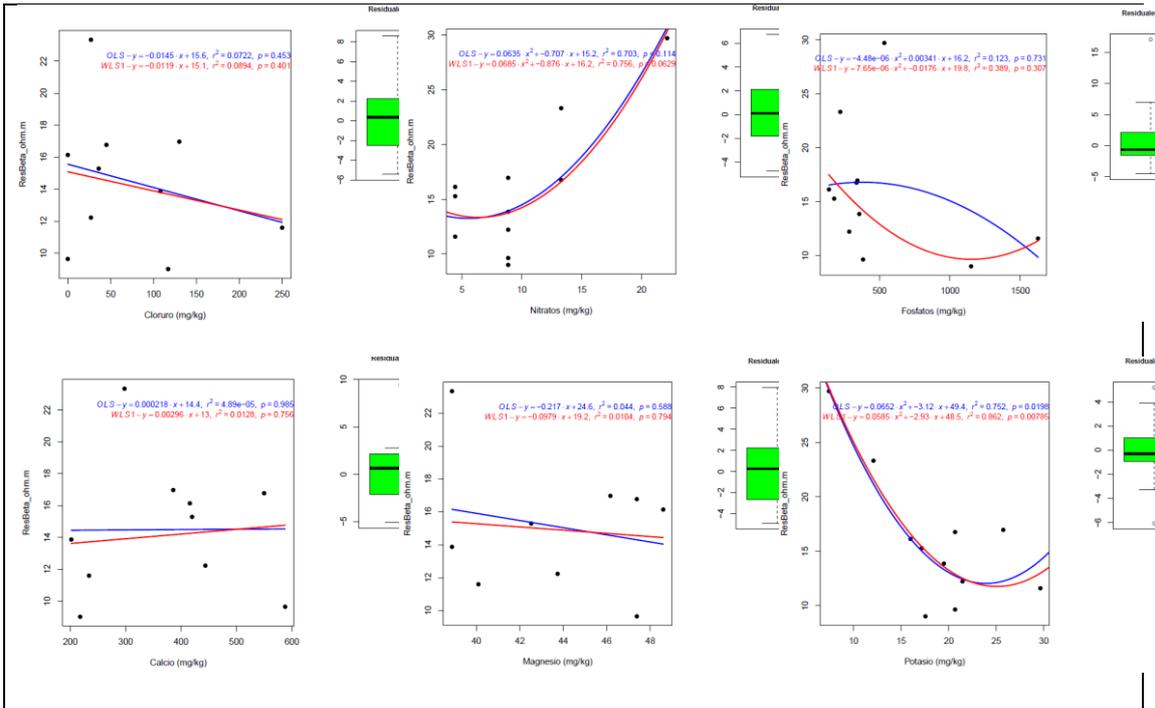


Figura A. 92: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad Sitio 2 mediante arreglo Wenner Beta. OLS (azul), WLS (rojo).

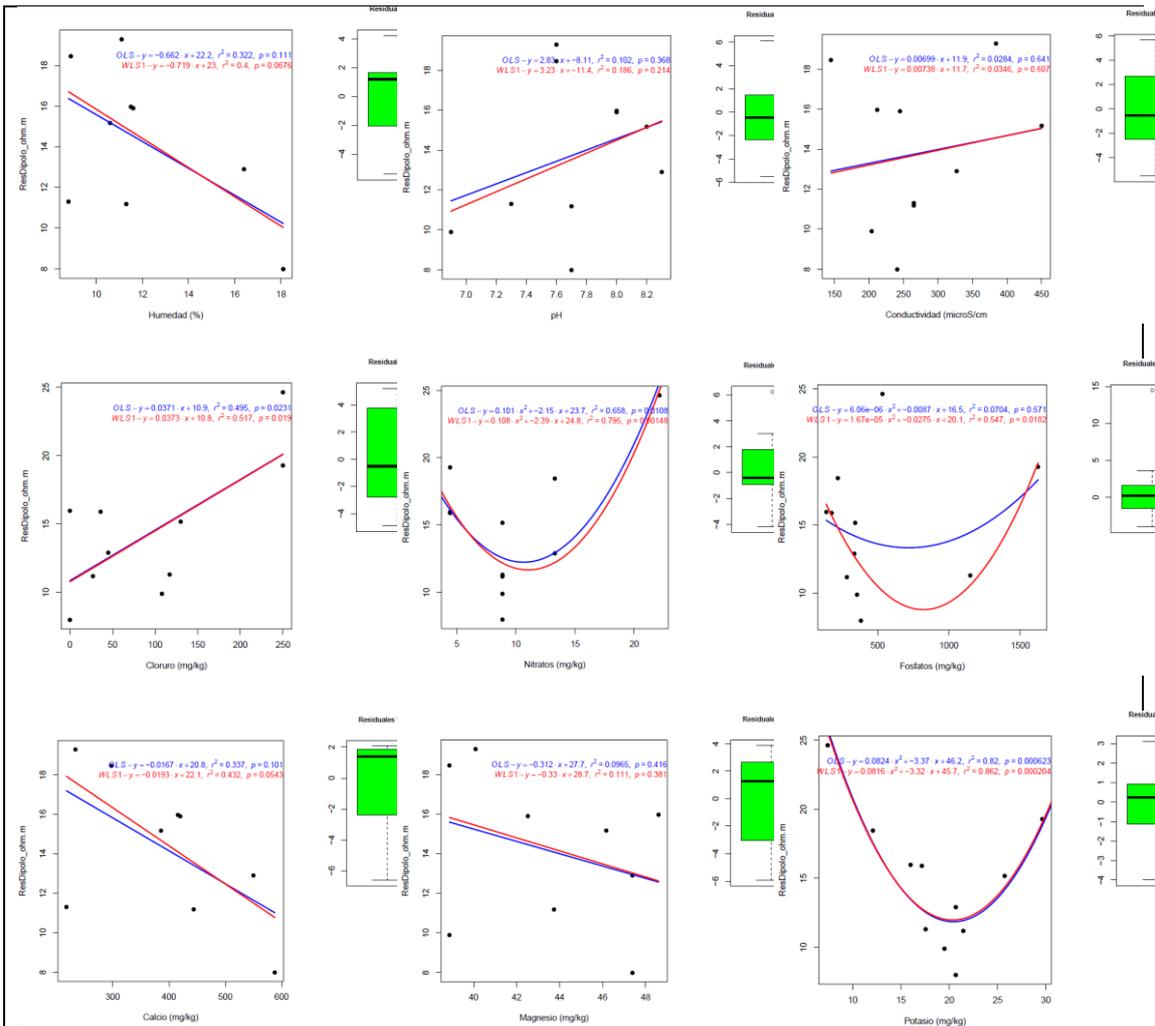


Figura A. 93: Regresión lineal entre parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo y resistividad Sitio 2 mediante arreglo Dipolo Dipolo. OLS (azul), WLS (rojo).

