

Agosto
2021

Estudio Hidrogeológico Parque Nacional Esteros de Farrapos



Ing. Agustín Menta
Ing. Alfonso Flaquer
Lic. Guillermo García
Ing. Manuel Giménez

Índice

RESUMEN	7
ABSTRACT.....	8
1 Introducción	10
2 Participaciones.....	15
3 Estado del arte.....	16
4 Materiales y Métodos.....	17
4.1 Descripción del sitio de estudio	17
4.2 Información de base.....	18
4.3 Banco de datos de Perforaciones.....	19
4.4 Geología.....	21
4.4.1 Geología de superficie	22
4.4.2 Geología estructural	27
4.4.3 Relevamiento geológico.....	27
4.4.4 Mapa geológico de la zona de estudio	28
4.4.5 Geología de subsuelo.....	29
4.4.6 Columna estratigráfica.....	30
4.5 Geofísica	31
4.5.1 Información antecedente	32
4.5.2 Relevamiento geofísico.....	33
4.6 Piezometría.....	35
4.6.1 Información antecedente	35
4.6.2 Relevamiento piezométrico	36
4.6.3 Procesamiento de datos	37
4.7 Hidroquímica e Isotopía	37
4.7.1 Red de muestreo.....	38
4.7.2 Recolección, conservación y transporte de muestras	39
4.7.3 Análisis de laboratorio y técnicas analíticas	41
4.7.4 Calidad de los análisis	41
5 Resultados	42
5.1 Banco de datos de perforaciones.....	42
5.2 Geología.....	43
5.2.1 Geología de superficie	43
5.2.2 Geología estructural	44
5.2.3 Relevamiento geológico.....	44
5.2.1 Mapa geológico de la zona de estudio	46
5.2.2 Geología de subsuelo.....	47
5.2.3 Columna estratigráfica.....	51
5.3 Geofísica	53
5.4 Interpretación Geológica a partir de los relevamientos geofísicos.....	54
5.5 Piezometría.....	58
5.6 Hidroquímica	61
5.6.1 Calidad de los análisis	61

5.6.2	Clasificación hidroquímica y tipos de agua	62
5.6.3	Aproximación a los procesos hidrogeoquímicos dominantes	68
5.6.4	Isotopía	73
5.7	Modelo Conceptual	74
6	Discusión.....	76
7	Conclusiones.....	80
8	Recomendaciones o acciones futuras	81
9	Bibliografía.....	82
10	Anexo.....	86
10.1	Información de base.....	86
10.1.1	Climatología	86
10.1.2	Hidrología Superficial	88
10.1.3	Suelos	90
10.2	Geofísica	94
10.2.1	Fundamento teórico de técnicas geofísicas utilizadas.....	94
10.2.2	Mediciones Geofísicas.....	101
10.3	Hidroquímica	123
10.3.1	Recolección y análisis de muestras	123
10.3.2	Resultados de análisis	125

Índice de Tablas

Tabla 1: Servicios Ecosistémicos proporcionados por los humedales. Fuente: Adaptado de Assessment (2005).	10
Tabla 2: Resumen de actividades de campo.	15
Tabla 3: Participaciones por capítulo.	15
Tabla 4: Sitios de Relevamiento Geológico. Coordenadas UTM Z21.	44
Tabla 5: Rangos de resistividad obtenida mediante ERT para cada formación en cada sitio.	57
Tabla 6: Rangos de resistividad obtenida mediante TDEM para cada formación en cada sitio.	58
Tabla 7: Parámetros del semivariograma teórico ajustado a los datos de nivel piezométrico.	59
Tabla 8: Características de muestreo y parámetros medidos en campo.	61
Tabla 9: Balance iónico de las muestras analizadas.	61
Tabla 10: Estaciones Meteorológicas. Coordenadas UTM 21S.	86
Tabla 11: Estaciones Pluviométricas. Coordenadas UTM 21S.	87
Tabla 12: Parámetros de las cuencas hidrológicas en la zona de estudio.	89
Tabla 13: Resistividades de diferentes materiales. (Modificada de Orellana, 1972).	97
Tabla 14: Recipientes utilizados para colecta de muestras.	123
Tabla 15: Métodos de conservación de las muestras.	124
Tabla 16: Sitios Muestreados y parámetros fisicoquímicos básicos obtenidos.	125
Tabla 17: Resultados de análisis químicos realizados en ActLabs.	126
Tabla 18: Resultados de análisis químicos realizados en ActLabs.	127
Tabla 19: Resultados de análisis químicos realizados en ActLabs.	128
Tabla 20: Resultados de análisis químicos realizados en ActLabs.	129
Tabla 21: Valores de ^{18}O y ^2H .	130

Índice de Figuras

Figura 1-1: Zona de estudio sobre imagen satelital.	14
Figura 4-1: Parque Nacional Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay.	18
Figura 4-2: Banco de datos de perforaciones.	20
Figura 4-3: Banco de datos de las perforaciones con perfil litológico	21
Figura 4-4: Mapa geológico de la zona de estudio (modificado de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000, Preciozzi et al., 1985).	23
Figura 4-5: Mapa geológico de la zona de estudio (modificado de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000, Bossi et al., 1998).	25
Figura 4-6: Ubicación de las hojas mapeadas en la Carta Geológica del Uruguay esc. 1:100.000, del año 1990.	26
Figura 4-7: Mapa de ubicación de los afloramientos relevados.	28
Figura 4-8: Mapa de ubicación de las perforaciones utilizadas para la realización de los cortes geológicos.	29
Figura 4-9: Mapa de ubicación de los relevamientos geofísicos y cortes geológicos.	30
Figura 4-10: Sondeos AMT-MT antecedentes en la zona de estudio.	32
Figura 4-11: Sitios de relevamientos geofísicos.	34
Figura 4-12: Piezometría - mayo 2016 (Fuente: De los Santos et al., 2017).	35
Figura 4-13: Perforaciones relevadas en la campaña de medición de niveles en febrero de 2018.	36
Figura 4-14: Perfiles de pozos muestreados.	38
Figura 4-15: Sitios muestreados para hidroquímica.	39
Figura 4-16: Acumulados mensuales de precipitación para los 2 años previos al período de muestreo (abril 2019).	40
Figura 5-1: Afloramiento de metarenisca silicificada de la Fm. Mercedes. Sitio EdF02.	45
Figura 5-2: Afloramiento de arenisca de color rojizo, poco consolidada con estructuras sedimentarias, perteneciente a la Fm. Salto. Sitio EdF03.	46
Figura 5-3: Mapa geológico de la zona de estudio. Escala 1:40.000.	47
Figura 5-4: Sección del mapa geológico de detalle de la zona de estudio donde se sitúan los cortes geológicos.	48
Figura 5-5: Corte geológico 1.	49
Figura 5-6: Corte geológico 2.	50

Figura 5-7: Corte geológico 3.	51
Figura 5-8: Columna estratigráfica definida en la zona de estudio.	52
Figura 5-9: Corte geólogo-geofísico en la ERT realizada en el Sitio 1.	54
Figura 5-10: Corte geólogo-geofísico en la ERT realizada en el Sitio 2.	55
Figura 5-11: Corte geólogo-geofísico en ERT realizada en el Sitio 3.	55
Figura 5-12: Corte geólogo-geofísico en la ERT realizada en el Sitio 4.	56
Figura 5-13: Corte geólogo-geofísico en la ERT realizada en el Sitio 5.	57
Figura 5-14: Corte geólogo-geofísico en la ERT realizada en el Sitio 6.	57
Figura 5-15: Histograma de datos de nivel piezométrico estático originales (izquierda) e histograma de los residuales de nivel estático eliminando la tendencia (derecha).	58
Figura 5-16: Semivariograma real y ajuste teórico mediante semivariograma esférico.	59
Figura 5-17: Piezometría – febrero 2018.	60
Figura 5-18: Diagrama de Piper de todas las muestras analizadas.	63
Figura 5-19: Diagramas de Piper de las muestras de agua superficial (izquierda) y muestras de agua subterránea (derecha).	63
Figura 5-20: Diagramas de Schöeller Berkaloff para las 14 muestras analizadas.	64
Figura 5-21: Subcuencas subterráneas identificadas.	65
Figura 5-22: Diagrama de Schöeller Berkaloff de los pozos muestreados.	66
Figura 5-23: Diagrama de Schöeller Berkaloff para las aguas subterráneas y aguas de cursos menores.	67
Figura 5-24: Diagrama de relaciones (Ca/Na) vs (HCO ₃ /Na) según fuente.	69
Figura 5-25: Diagrama bidimensional (HCO ₃ + SO ₄) vs (Ca + Mg)	69
Figura 5-26: Diagrama bidimensional HCO ₃ vs Ca.	70
Figura 5-27: Diagrama bidimensional SO ₄ vs Ca.	71
Figura 5-28: Diagrama bidimensional Na vs Cl.	72
Figura 5-29: Diagrama bidimensional (Ca+Mg) - (HCO ₃ +SO ₄) vs (Na+K-Cl).	73
Figura 5-30: Representación de los valores isotópicos para las muestras analizadas.	73
Figura 5-31: Representación del modelo conceptual.	76
Figura 10-1: Estaciones Meteorológicas INUMET.	86
Figura 10-2: Red de drenaje de la zona de estudio. Fuente IDE.	88
Figura 10-3: Cuencas hidrológicas y cursos de agua principales en la zona de estudio.	89
Figura 10-4: Usos de suelo de la zona de estudio. Fuente MGAP (2018).	90
Figura 10-5: Unidades de Suelos en el área de estudio según MGAP (2017).	91
Figura 10-6: Clasificación de suelos según agua disponible. Molfino y Califra (2001).	93
Figura 10-7: Clasificación de suelos según grupo hidrológico. Molfino y Califra (2001).	93
Figura 10-8: Cubo de lado L donde se inyecta una corriente I y se genera una diferencia de potencial V. (Reynolds, 1997).	94
Figura 10-9: Adquisidor de datos, cables multinúcleo y electrodos para ERT. Fuente Geomative	95
Figura 10-10: Arreglo tetraeléctrico para medición eléctrica. Reynolds, (1997).	95
Figura 10-11: a) Wenner Alpha; b) Wenner Beta; c) Wenner Gamma; d) Wenner Schlumberger e) Dipolo-Dipolo. (Loke, 2004)	96
Figura 10-12: Arreglo Wenner Alpha en tomografía geoelectrica. Manual Usuario WDJ-4 BTKS.	97
Figura 10-13: Esquema de la metodología TDEM. Extraído de Alpha Geo Science.	99
Figura 10-14: Voltaje medido en el receptor en función del tiempo. Ejes en escala doble logarítmica. Tomado de McNeill (1994).	100
Figura 10-15: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 1 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.	101
Figura 10-16: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 1 utilizando un dispositivo Wenner Beta.	102
Figura 10-17: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 1 utilizando un dispositivo Wenner Gamma.	102
Figura 10-18: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 1 utilizando un dispositivo Wenner Schlumberger.	103
Figura 10-19: Resultado de ERT sitio 1, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 120 m.	104
Figura 10-20: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 2 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.	105
Figura 10-21: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 2 utilizando un dispositivo Wenner Beta.	105

<i>Figura 10-22: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 2 utilizando un dispositivo Wenner Gamma.</i>	106
<i>Figura 10-23: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 2 utilizando un dispositivo Wenner Schlumberger.</i>	106
<i>Figura 10-24: Resultado de ERT sitio 2, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 90 m.</i>	107
<i>Figura 10-25: Perfil de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de TDEM Sitio 2.</i>	108
<i>Figura 10-26: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 3 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.</i>	109
<i>Figura 10-27: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 3 utilizando un dispositivo Wenner Beta.</i>	109
<i>Figura 10-28: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 3 utilizando un dispositivo Wenner Gamma.</i>	110
<i>Figura 10-29: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 3 utilizando un dispositivo Wenner Schlumberger.</i>	110
<i>Figura 10-30: Resultado de ERT sitio 3, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 90 m.</i>	111
<i>Figura 10-31: Perfil de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de TDEM Sitio 3.</i>	112
<i>Figura 10-32: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 4 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.</i>	113
<i>Figura 10-33: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 4 utilizando un dispositivo Wenner Beta.</i>	113
<i>Figura 10-34: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 4 utilizando un dispositivo Wenner Gamma.</i>	114
<i>Figura 10-35: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 4 utilizando un dispositivo Wenner Schlumberger.</i>	114
<i>Figura 10-36: Resultado de ERT sitio 4, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 50 m.</i>	115
<i>Figura 10-37: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 5 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.</i>	116
<i>Figura 10-38: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 5 utilizando un dispositivo Wenner Beta.</i>	116
<i>Figura 10-39: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 5 utilizando un dispositivo Wenner Gamma.</i>	117
<i>Figura 10-40: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 5 utilizando un dispositivo Wenner Schlumberger.</i>	117
<i>Figura 10-41: Resultado de ERT sitio 5, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 60 m.</i>	118
<i>Figura 10-42: Perfil de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de TDEM Sitio 5.</i>	119
<i>Figura 10-43: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 6 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.</i>	120
<i>Figura 10-44: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 6 utilizando un dispositivo Wenner Beta.</i>	120
<i>Figura 10-45: Resultado de ERT sitio 6, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 60 m.</i>	121
<i>Figura 10-46: Perfil de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de TDEM Sitio 6.</i>	122

RESUMEN

Los trabajos realizados se enmarcan en el área de influencia del Parque Nacional Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay (PNEF) sitio perteneciente a la Convención Relativa a los humedales de importancia Internacional (Convenio firmado el 2/2/1971 en Ramsar, Irán). El estudio se centra en la zona comprendida entre las localidades de San Javier y Nuevo Berlín, abarcando un área de 550 km². Los estudios fueron realizados en el período enero 2018 - julio 2019.

El trabajo comprende los estudios realizados para la primera caracterización hidrogeológica de la zona cercana al Parque Nacional.

Para la realización del estudio se utilizaron herramientas de uso habitual en el estudio de humedales y su vinculación con el agua subterránea. Inicialmente se realizó un relevamiento piezométrico para conocer el comportamiento hidráulico del flujo subterráneo y su vinculación con los cursos de agua superficiales. Mediante el relevamiento de niveles en casi 100 pozos, se elaboró el primer mapa piezométrico en detalle de la zona de estudio.

Se profundizó en el conocimiento de la geología en la zona, mediante foto interpretación de fotografías aéreas para la elaboración del mapa geológico de superficie a escala 1:40.000 y la elaboración de 3 cortes geológicos que muestran el desarrollo de la geología en subsuperficie.

Se utilizó la geofísica mediante la realización de tomografías de resistividad eléctrica (ERT) y transiente electromagnético de dominio en el tiempo (TDEM) con la finalidad de complementar la información geológica faltante en seis sitios de interés.

Se utilizaron herramientas hidroquímicas e isotópicas para caracterizar el agua subterránea y superficial, así como conocer la posible interacción existente entre ellas y los humedales. Se ha realizado el primer muestreo hidroquímico e isotópico de las aguas subterráneas y superficiales en la cuenca de aporte de los esteros, colectando muestras de agua superficial, subterránea y de los humedales de los esteros.

Tomando como base la información geológica brindada por las perforaciones estudiadas y los perfiles geofísicos analizados, se estima que la Fm. Fray Bentos es la que subyace a la zona de humedales presente en la costa del Río Uruguay, por lo tanto, la que podría descargar en forma directa el agua subterránea hacia el humedal. Sin duda que esto podría presentar variaciones si se contara con información detallada del desarrollo de la geología en subsuelo en la zona del humedal.

La piezometría realizada evidencia la existencia de flujos en dirección este – oeste, con una marcada descarga hacia la zona de ubicación del PNEF. Sumado a lo anterior, se observa la interacción con los cursos de agua superficial menores, como el Arroyo Isletas y el Arroyo Cañada del Sauce los cuales oficialían, al igual que el Río Uruguay, de zonas de descarga del acuífero. En cuanto a la recarga, la misma se daría en toda el área de estudio debido a las características litológicas de la Fm. Salto y Fm. Fray Bentos, con mayor extensión en superficie.

El estudio hidrogeológico de la cuenca del PNEF ha permitido mejorar la comprensión del modelo conceptual hidrológico de los humedales de Esteros de Farrapos. Los resultados preliminares indican que existe vinculación hidrológica entre los cursos de

agua de la cuenca del PNEF y de los humedales con el sistema de flujo de agua subterránea que se desarrolla en la zona. Sin embargo, es necesario ampliar el volumen de información hidrogeológica para profundizar en el conocimiento del vínculo agua superficial - agua subterránea – humedal.

Los resultados obtenidos muestran los beneficios en la utilización de técnicas complementarias para el estudio hidrogeológico en una zona en particular. Este trabajo permitió validar algunas de las hipótesis planteadas sobre el funcionamiento hidrológico del sistema, generando información primaria de base para la realización de planes de gestión orientados a la preservación de los humedales, así como definir un punto de partida para futuros estudios que permitan ampliar el conocimiento del mismo.

Palabras clave: Hidrogeología, humedales, Hidroquímica.

ABSTRACT

The work carried out is framed in the area of influence of the Esteros de Farrapos and Islas del Río Uruguay National Park (PNEF), site belonging to the Convention Relative to Wetlands of International Importance (Agreement signed on 2/2/1971 in Ramsar, Iran). The study focuses on the area between San Javier and Nuevo Berlin cities, covering an area of 550 km². The studies were carried out between January 2018 - July 2019.

The work includes the first hydrogeological characterization of the area near the National Park.

To carry out the study, tools commonly used in the study of wetlands and their relationship with groundwater were used. Initially, a piezometric survey was carried out to know the hydraulic behavior of groundwater flow and its link with surface water courses. By measuring levels in almost 100 wells, the first detailed piezometric map of the study area was elaborated.

The knowledge of the geology in the area was deepened, by means of photo interpretation of aerial photographs for the elaboration of the geological map of the surface at a scale of 1: 40,000 and the elaboration of 3 geological sections that show the development of the subsurface geology.

Geophysics was used by conducting electrical resistivity tomography (ERT) and time domain electromagnetic transient (TDEM) to complement the missing geological information.

Hydrochemical and isotopic tools were used to characterize groundwater and surface water, as well as to study interaction between them and the wetlands. The first hydrochemical and isotopic sampling of groundwater and surface water in the basin of the PNEF has been carried out, collecting samples of surface water, groundwater, and wetlands.

Based on the geological information provided by the drilling studied and the geophysical profiles analyzed, it is estimated that the Fm. Fray Bentos is the one that underlies the area of wetlands present on the coast of the Río Uruguay, therefore, the one that could directly discharge the groundwater into the wetland. This could be confirmed if detailed information on the development of subsoil geology in the wetland area were available.

The piezometric study shows the existence of flows in an east - west direction, with a marked discharge towards the PNEF location area. In addition, the interaction with minor surface water courses is observed, such as the Arroyo Isletas, the Arroyo Cañada del Sauce and Río Uruguay, serve as discharge areas for the aquifer. There are no specific recharge areas on the piezometric map.

The hydrogeological study of the PNEF basin has made it possible to improve the understanding of the hydrological conceptual model of the wetlands of Esteros de Farrapos. Preliminary results indicate that there is a hydrological link between the water courses of the PNEF basin and the wetlands with the groundwater flow system that develops in the area. However, it is necessary to expand the volume of hydrogeological information to deepen our understanding of the surface water - groundwater - wetland link.

The results obtained show the benefits in the use of complementary techniques for the hydrogeological study in a particular area. This work made it possible to validate some of the initial hypotheses about the hydrological functioning of the system, generating primary base information for the development of management plans for the preservation of wetlands, as well as defining a starting point for future studies that allow expanding the knowledge of PNEF.

keywords Hydrogeology, wetlands, Hydrochemistry.

1 Introducción

Este informe resume las actividades realizadas y principales resultados obtenidos en el marco del trabajo final de los estudiantes Alfonso Flaquer, Agustín Menta, Guillermo García y Manuel Giménez de la Diplomatura de Especialización en Hidrología Subterránea de la Facultad de Ingeniería-Universidad de la República (UDELAR). Fue financiado por el Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas (CEREGAS) y Ramsar y tuvo el apoyo logístico del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) San Javier.

A nivel mundial, los servicios ecosistémicos (SE) de los humedales son enormes y superan con creces a los de los ecosistemas terrestres. Estos SE abarcan desde la seguridad alimentaria hasta la mitigación del cambio climático. Las sociedades obtienen beneficios como consecuencia de la comercialización de la enorme biodiversidad existente en los humedales, los cuales brindan beneficios a través de la flora, la fauna y los minerales, suministrando alimentos, agua, madera, fibra o recursos genéticos (Díaz Carrión et al., 2018; Clarkson et al., 2013; Van Klink et al., 2016).

Como se aprecia en la Tabla 1, los servicios ecosistémicos de aprovisionamiento son de los más valiosos para las sociedades debido a que están vinculados con un número significativo de necesidades básicas para las sociedades, particularmente las de tipo rural que no siempre cuentan con otras opciones para obtener los beneficios brindados por los humedales (Kakuru et al., 2013).

Otros servicios ecosistémicos de aprovisionamientos importantes son el forraje para animales, la leña, la turba hortícola, las plantas para elaboración de medicina tradicional, las fibras, los colorantes o los taninos (Clarkson et al., 2013).

Junto con los servicios ecosistémicos de aprovisionamiento mencionados anteriormente, se encuentra también la provisión de agua, en donde los humedales continentales se encuentran dentro de las principales fuentes para el consumo humano (Liu, 2014; Mueller et al., 2016; Zheng et al., 2008).

Por otro lado, los humedales proveen importantes servicios ecosistémicos de regulación relativos al mejoramiento de las condiciones hídricas, climáticas y ambientales (Clarkson et al., 2013; Greeson et al., 1979; Ramsar, 2009b).

Tabla 1: Servicios Ecosistémicos proporcionados por los humedales. Fuente: Adaptado de Assessment (2005).

Alimento	Producción de pescado, caza, frutas y granos
Agua dulce*	Almacenamiento y retención de agua para uso doméstico, industrial y agrícola.
Fibra y combustible	Producción de troncos, leña, turba, forraje.
Bioquímicos	Extracción de medicinas y otros materiales desde la biota.
Materiales genéticos	Genes para resistencia y patógenos de plantas, especies ornamentales, etc.
De regulación	

Regulación del clima	Fuente y sumidero de gases de efecto invernadero, influencia sobre temperatura, precipitación y otros procesos.
Regulación de agua	Recarga y descarga de agua subterránea
Purificación y tratamiento de residuos	Retención, recuperación y eliminación del exceso de nutrientes y otros contaminantes.
Regulación de la erosión	Retención de suelos y sedimentos.
Regulación de desastres naturales	Control de inundaciones, protección contra tormentas.
Polinización	Hábitat de polinizadores.
Culturales	
Espirituales	Proyección de valores espirituales vinculados a los ecosistemas de humedales.
Recreativos	Entorno propicio para ocio.
Estéticos	Paisaje atractivo y valores estéticos.
Educacionales	Sensibilización medio ambiental y socio-cultural.
De apoyo	
Formación de suelos	Retención de sedimentos y acumulación de materia orgánica.
Ciclo de nutrientes	Almacenaje, reciclaje, procesamiento y adquisición de nutrientes
* También puede ser un SE de Regulación	

Los cuerpos de agua superficial son parte activa del sistema de flujo del agua subterránea (Winter, 1999). Muchos humedales están hidrológica y ecológicamente influenciados por las aguas subterráneas. El grado de interacción puede ser muy variable. Existen humedales completamente dependientes de la descarga de aguas subterráneas en diferentes condiciones climáticas, en tanto que otros pueden tener un grado de dependencia muy limitado, por ejemplo, solo en condiciones de sequía extrema (Pritchard, 2010).

Los recursos hídricos (tanto las aguas superficiales como las aguas subterráneas) y los humedales deben ser objeto, por tanto, de un manejo integrado para garantizar la sostenibilidad del ecosistema y del agua que proporciona (Convención de Ramsar, 2010). Para ello, es imprescindible conocer la vinculación entre las distintas aguas y el modelo conceptual hidrológico e hidrogeológico de la cuenca en la que se ubica el humedal. Para comprender mejor la dependencia de los humedales con el agua subterránea, gestionar el manejo de los sistemas acuíferos conectados a los humedales y proteger la calidad del agua de los humedales, es imperativo poder documentar la conexión y cuantificar los flujos de agua y solutos entre los ecosistemas de aguas subterráneas y humedales. (Gilfedder et al., 2015).

Comprender la vinculación entre aguas superficiales y aguas subterráneas puede ayudar a los administradores de los recursos hídricos en la toma de decisiones, relacionadas con la mitigación de inundaciones, el aprovechamiento de las aguas

subterráneas y la conservación de la biodiversidad, en forma más integrada y sostenible (Schot y Winter, 2006).

Elaborar modelos conceptuales que expliquen el funcionamiento y relación de los cuerpos de agua de una zona, resulta esencial para generar políticas de gestión del recurso hídrico. Conocer en detalle la geología de la zona de estudio aporta conocimiento vital para la elaboración de un modelo conceptual del funcionamiento del flujo subterráneo. El conocimiento geológico puede complementarse con información piezométrica en el área de estudio, que aporte información sobre las direcciones del flujo subterráneo, la interacción entre agua subterránea – superficial y la existencia de zonas de recarga y descarga de flujos subterráneos.

No se han encontrado trabajos o proyectos de investigación que estudien el funcionamiento hidrogeológico en el área del PNEF, ni un modelo conceptual que relacione la hidrología de superficie con la hidrogeología y los humedales existentes en el Parque. Es importante profundizar en el conocimiento de esta interacción, ya que los Esteros de Farrapos constituyen uno de los humedales de mayor extensión del país y proveen importantes servicios ecosistémicos como el control de inundaciones, la estabilización de la costa y la protección contra eventos extremos, la mitigación al cambio climático y son importantes reservorios de biodiversidad (MVOTMA, 2018).

El uso de suelo de la cuenca que se encuentra fuera del área protegida comprende la forestación para la industria papelera, con fuerte intensificación en esta zona del territorio uruguayo en los últimos 20 años, así como la producción agrícola intensiva de cultivos de soja y maíz. Una pequeña porción del territorio es dedicada a la producción ganadera extensiva. Según Gazzano y Achkar (2014), en 13 años, los usos menos intensivos pasaron de 60 a 20 % y los más intensivos de 40 a 80%. Al tomar como base 1998, para el año 2014 los bosques nativos habían disminuido 92% y el pastizal 52%. Esto genera un aumento de la presión ambiental sobre la zona protegida del PNEF.

Pese a que los Esteros de Farrapos tienen una considerable importancia ambiental, no se cuenta en la actualidad con información adecuada que permita determinar de manera objetiva el modelo conceptual del funcionamiento hidrológico y la vinculación de los humedales con la hidrogeología local.

La principal hipótesis manejada plantea que existen aportes de agua subterránea hacia los humedales, mediante dos mecanismos bien diferenciados. Se plantea que los principales cursos de agua superficial en las inmediaciones de la zona de estudio, afluentes al PNEF, reciben aportes de agua subterránea. Por otro lado, se plantea que existe una descarga directa del acuífero a los humedales del PNEF a través de la o las distintas formaciones geológicas que subyacen a los humedales.

El objetivo general del trabajo técnico es realizar una primera caracterización hidrogeológica de la zona de influencia del PNEF y confirmar, mediante estudios piezométricos, hidroquímicos e isotópicos, las hipótesis planteadas sobre la vinculación de los humedales con el agua subterránea y superficial, de forma de ampliar el conocimiento del funcionamiento hidrológico del sistema de humedales de la zona de estudio.

En el contexto de la aplicación de técnicas hidroquímicas e isotópicas, se plantearon como objetivos específicos caracterizar las facies de las diferentes aguas que componen

el marco hidrogeológico de la cuenca en estudio, evaluar posibles procesos modificadores a lo largo de las líneas de flujo, aportar información sobre la vinculación de los diferentes cuerpos de agua entre sí y sobre las condiciones de recarga de las distintas aguas del sistema.

Otro de los objetivos específicos es aportar información respecto al modelo geológico en sitios donde se tiene incertidumbre o falta de información en detalle. Para esto, se realizó relevamiento de campo, se conformó una base de datos de perforaciones existentes y se complementó con estudios geofísicos aquellas zonas de interés con faltantes de información.

Finalmente, otro de los objetivos específicos planteados dentro de este estudio es la conformación de una base de datos ordenada, con toda la información existente, en un sistema de información geográfica, que pueda ser utilizada en este trabajo o en futuros estudios.

En la Figura 1-1 se muestra la zona que se delimitó para el presente estudio. El área de estudio se definió coincidiendo con la cuenca de aporte superficial del PNEF. Esta delimitación se realizó en función de que uno de los objetivos principales del trabajo es investigar la relación entre el agua subterránea y los humedales, ya sea que se relacionen directamente o mediante los cursos de agua superficiales que tienen incidencia en los esteros.

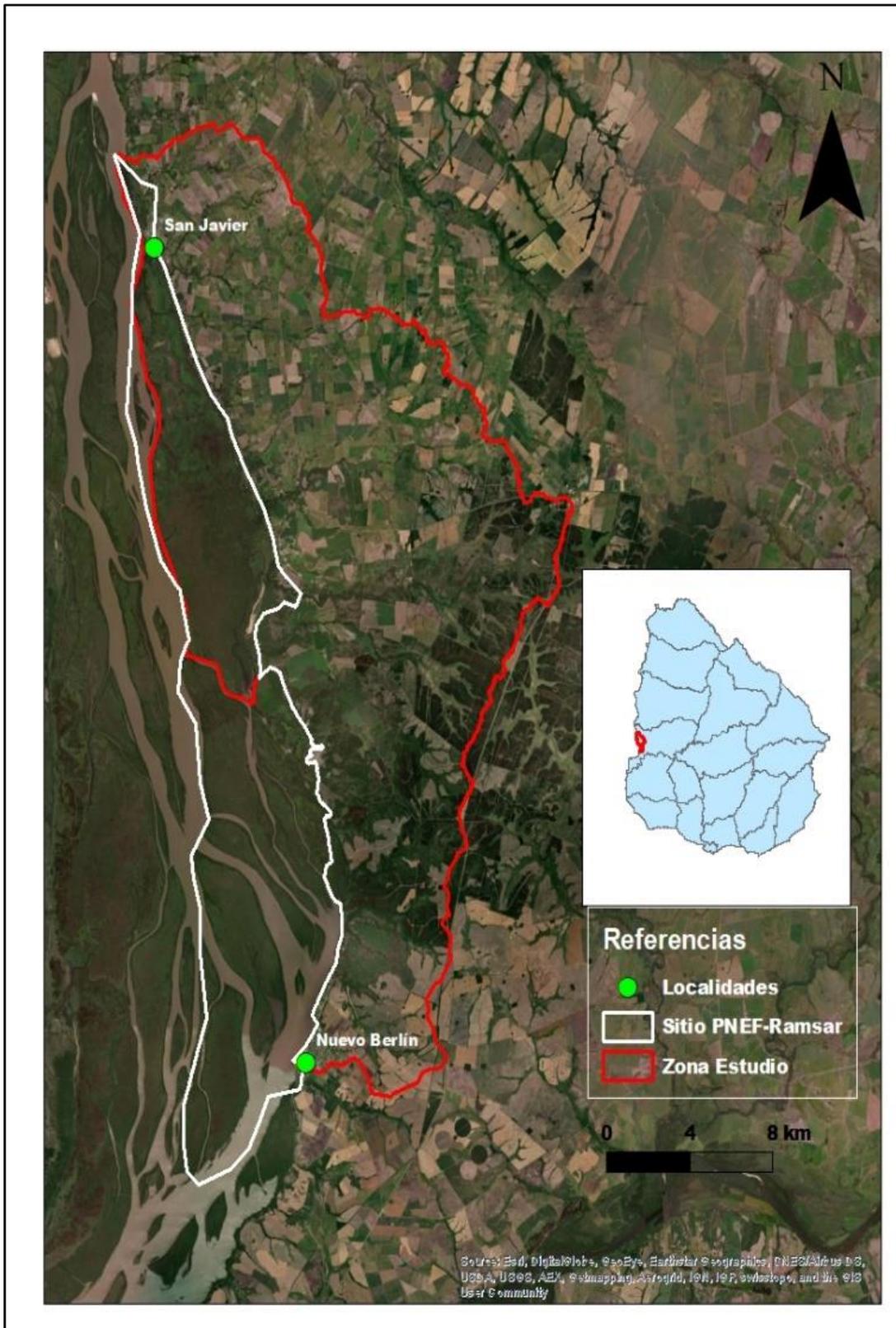


Figura 1-1: Zona de estudio sobre imagen satelital.

2 Participaciones

Se realizaron en total tres salidas de campo al sitio de estudio. La Tabla 2 resume las actividades realizadas en cada salida y sus participantes.

Tabla 2: Resumen de actividades de campo

Período	Actividad	Participantes
12/2/2019 – 16/2/2019	Relevamiento piezométrico	A. Menta, A. Flaquer, G. García y M. Giménez
14/4/2019 – 17/4/2019	Campaña muestreo hidroquímica e isotopía	A. Flaquer y M. Giménez
15/5/2019 – 17/5/2019	Relevamiento geofísico y geológico	A. Menta, A. Flaquer, G. García

Como se mencionó anteriormente este informe resume las actividades realizadas y principales resultados obtenidos en el marco del trabajo final de la Diplomatura de Especialización en Hidrología Subterránea. Se optó por la elaboración de un solo informe de modo de lograr un documento que contenga toda la información de base recabada y los nuevos aportes y conclusiones de las actividades realizadas en el marco de este trabajo.

La elaboración de los diferentes capítulos se distribuyó entre los distintos autores, buscando potenciar las capacidades y conocimientos individuales, en las diferentes temáticas abarcadas en el estudio.

Finalmente, se realizó un análisis en conjunto de toda la información procesada, con el objetivo de lograr una mirada conjunta de toda la información y aportes de cada técnica o metodología aplicada, necesaria para comprender el funcionamiento del sistema hidrogeológico en su conjunto.

En la Tabla 3 se resumen las participaciones de cada autor en los diferentes capítulos.

Tabla 3: Participaciones por capítulo.

Capítulo	Participantes
Descripción del área de estudio	A. Menta, A. Flaquer
Estudio de antecedentes	A. Menta, M. Giménez
Banco de datos de perforaciones	A. Menta, G. García
Marco Geológico	G. García
Geofísica	A. Menta, A. Flaquer, G. García.
Piezometría	A. Menta, A. Flaquer, G. García, M. Giménez

Hidroquímica e isotopía

M. Giménez, A. Flaquer

Conclusiones generales

A. Menta, A. Flaquer, G. García y M. Giménez

3 Estado del arte

En el PNEF se han desarrollado numerosos estudios de carácter agronómico y biológico, determinando las especies de flora y fauna que habitan la zona y su adaptabilidad al medio (Ernst et al., 2018; Sosa et al., 2018; Díaz y Achkar 2010; Chebataroff 1980). Sin embargo, los estudios hidrológicos e hidrogeológicos han sido escasos y no se han encontrado antecedentes bibliográficos al respecto.

Este parque se emplaza sobre una zona de descarga del Sistema Acuífero Mercedes (SAM), el cual es un sistema de agua subterránea regional de doble porosidad ubicado en la región oeste del Uruguay, abarcando aproximadamente 11500 km² (De los Santos et al.; 2020). Los trabajos antecedentes más importantes de este sistema acuífero son Corbo et al. 2014 y De los Santos et al. 2020. En este último proyecto se realizó la primera caracterización hidrogeológica y primer modelo de flujo del SAM. Dicho proyecto fue ejecutado en conjunto por el Grupo de Hidrología Subterránea (GHS) de Facultad de Ingeniería, UdelaR y por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Se determinó un primer modelo conceptual y modelo de flujo en régimen estacionario del acuífero, una caracterización hidroquímica primaria de las aguas del acuífero, una primera carta parcial de vulnerabilidad y un mapa hidrogeológico del SAM. El estudio realizado tiene un carácter regional, brindando un primer antecedente de estudio hidrogeológico de la zona. De todos modos, la escala del mismo, que abarcó un área de 11500 km², no permite determinar el modelo conceptual en la zona de los Esteros de Farrapos.

4 Materiales y Métodos

En el presente capítulo se presenta la descripción del sitio de estudio, la información de base disponible y la metodología utilizada para alcanzar los objetivos planteados.

4.1 Descripción del sitio de estudio

El PNEF abarca un total de 202 km² en territorio uruguayo sobre las costas del Río Uruguay, extendiéndose de norte a sur desde la localidad de San Javier hasta la localidad de Nuevo Berlín. En esta zona se incluyen diversos ambientes como los esteros, el albardón, la paleocosta, los canales y 24 islas e islotes sedimentarios (Figura 4-1).

En 2004, 175 km² de esta zona, que incluyeron los esteros y 24 islas, fueron designadas como sitio Ramsar. La Convención sobre los Humedales, llamada la Convención de Ramsar, es el tratado intergubernamental que entró en vigor en el año 1975 y cuyo objetivo es la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos. Desde su aprobación, casi el 90% de los Estados miembros de las Naciones Unidas se han adherido al tratado.

Uruguay cuenta actualmente con 3 sitios designados como Humedales de Importancia Internacional (sitios Ramsar), con una superficie de 4358 km².

Posteriormente en 2008, a través del decreto 579/008, promulgado el 27 de noviembre de ese año, 58.5 km² de esta zona ingresaron al Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), incluyendo al área continental próxima a San Javier, y dos islas (Barco Grande y La Paloma). En el año 2018, se incorporan otros 110.5 km² de superficie al SNAP.

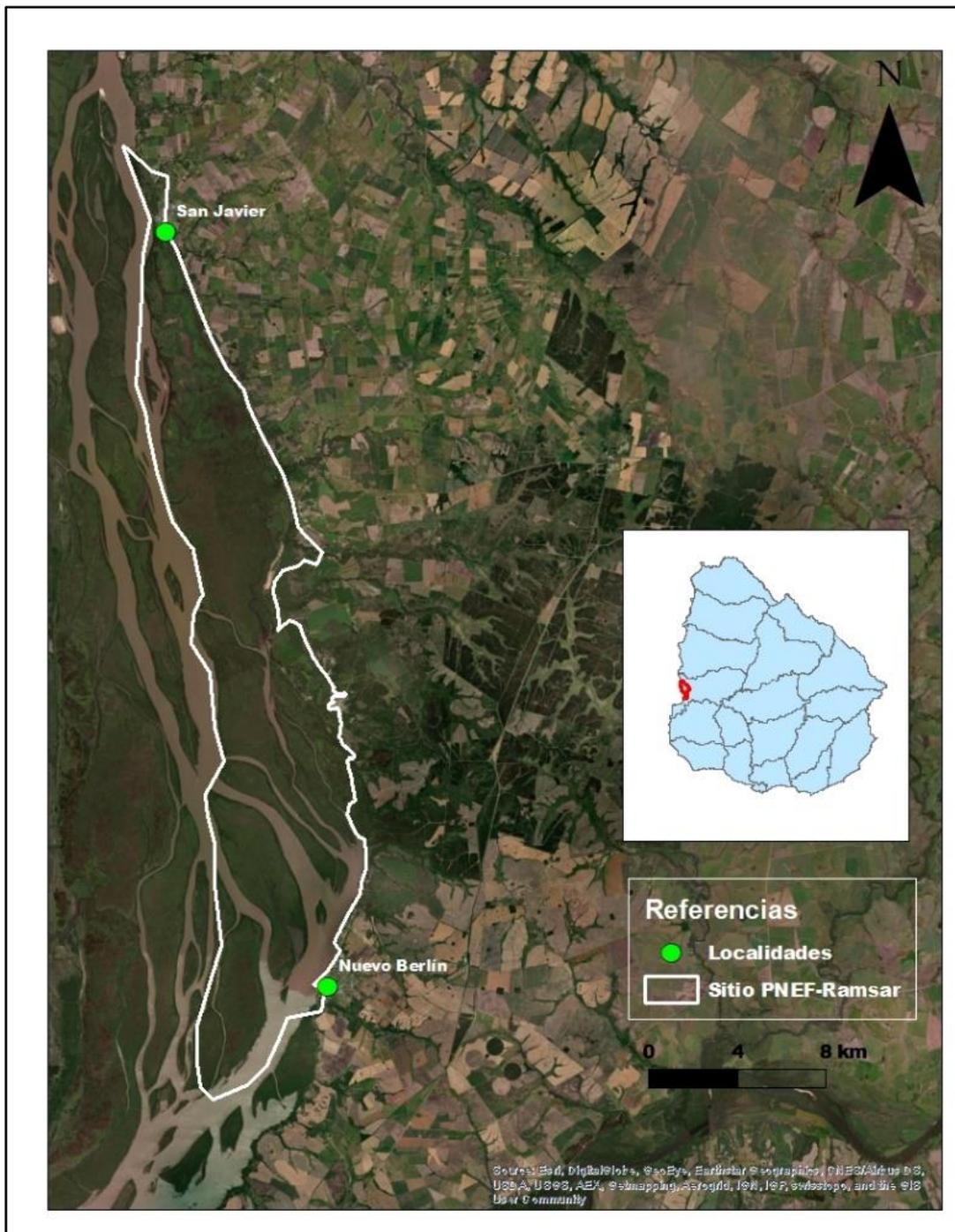


Figura 4-1: Parque Nacional Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay.

4.2 Información de base

Uno de los objetivos específicos planteados comprende la conformación de una base de datos ordenada, con toda la información existente, en un sistema de información geográfica, que pueda ser utilizada en este trabajo o en futuros estudios. En este sentido se reunió toda la información antecedente relacionada a la climatología, tipos de suelo y se realizó una caracterización hidrológica de las cuencas de aporte al PNEF. Esta información se presenta en el Anexo, capítulo 10.1.

4.3 Banco de datos de Perforaciones

La información existente de perforaciones es muy dispar, concentrándose cerca de los centros poblados y existiendo grandes vacíos de información en la zona central de la zona de estudio.

El banco de datos de perforaciones se conformó con datos de 79 puntos. De los 79 puntos mencionados, se contaba con 67 obtenidos del estudio antecedente (De los Santos et al., 2020) y los restantes 12 perfiles se obtuvieron en el presente trabajo. Los perfiles se distribuyen según la fuente, 15 sitios aportados por el banco de datos del IMFIA (BDIMFIA), 16 sitios por la Dirección Nacional del Agua (DINAGUA-MVOTMA), 27 sitios aportados por una tesis de grado de Facultad de Ciencias (Bonjour, 2013), 4 perforaciones de las Obras Sanitarias del Estado (OSE) y 17 perfiles aportados por el Proyecto de Producción Responsable (PPR) del Ministerio de ganadería Agricultura y Pesca (MGAP). En la Figura 4-2, se muestra la ubicación de las perforaciones dentro de la zona de estudio. Puede observarse que la información disponible de perforaciones se encuentra concentrada en la zona de San Javier y Nuevo Berlín. De estas 79 perforaciones, solo 43 perforaciones cuentan con perfil litológico (Figura 4-3).

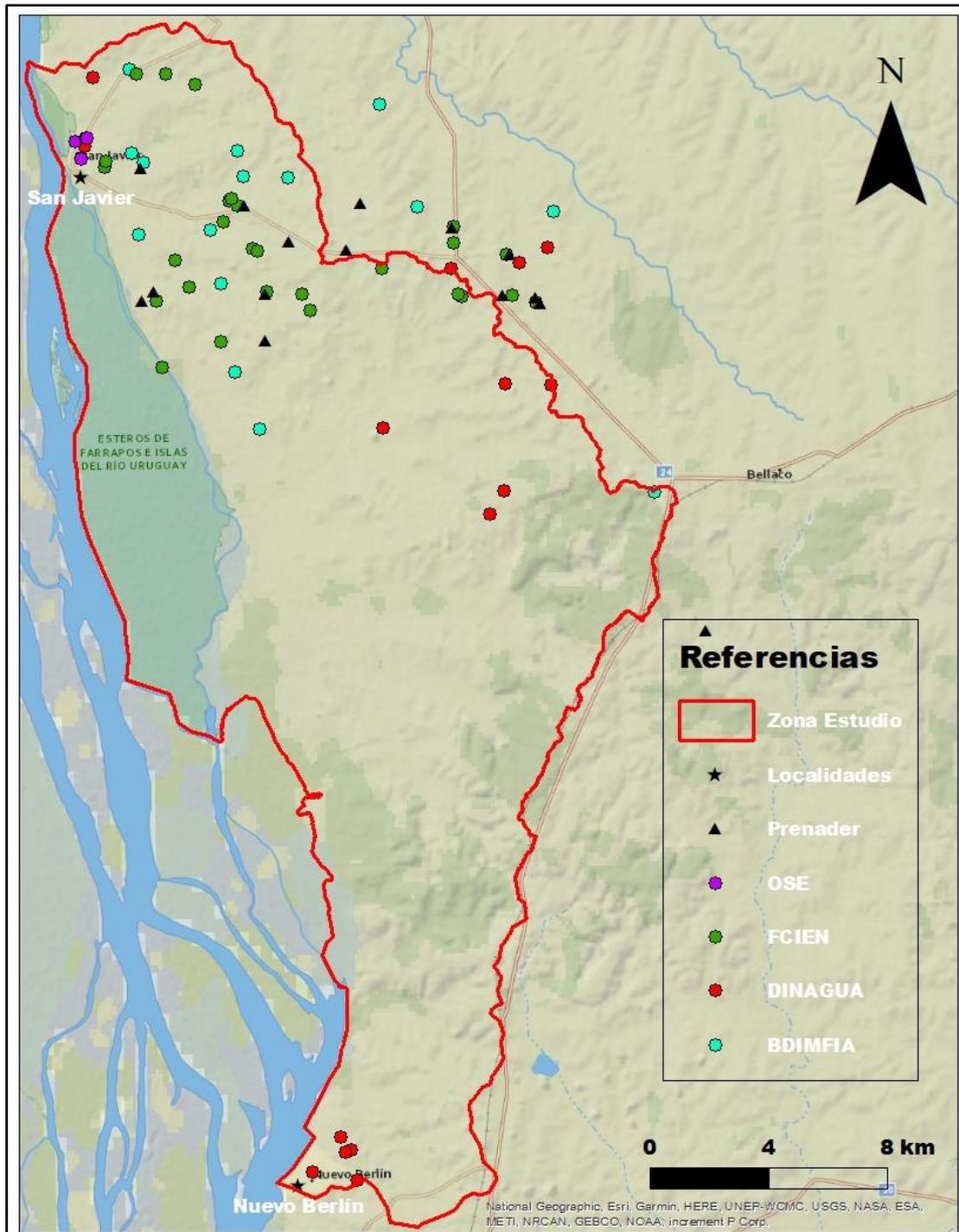


Figura 4-2: Banco de datos de perforaciones.

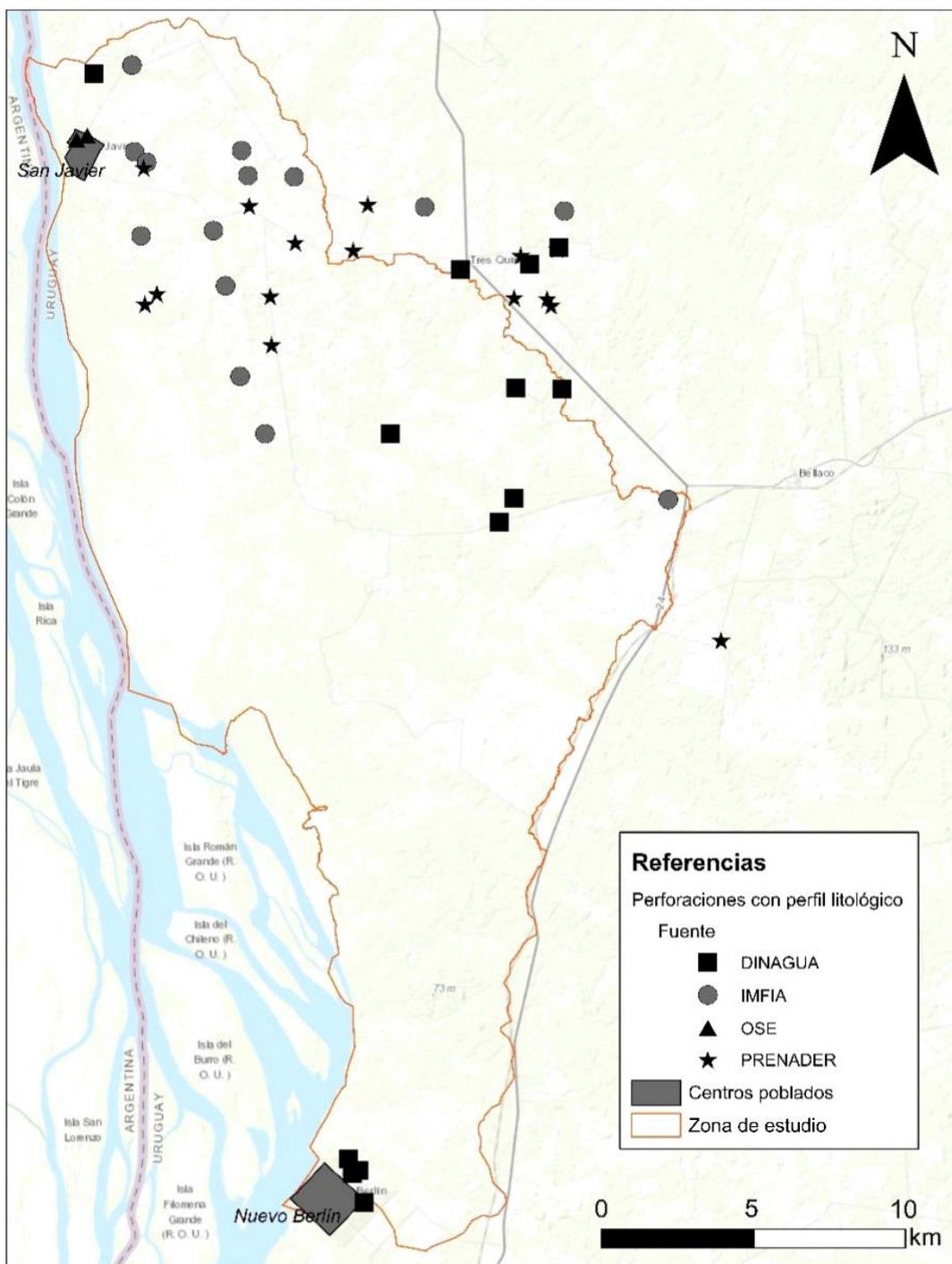


Figura 4-3: Banco de datos de las perforaciones con perfil litológico

4.4 Geología

Para realizar esta sección, se trabajó con la información de estudios antecedentes en la zona, la fotointerpretación de fotografías aéreas escala 1:40.000 y el análisis de la información de perfiles litológicos de perforaciones. Como resultado, se obtuvo el mapa geológico a escala 1:40.000 de la zona comprendida entre San Javier (al norte), Nuevo Berlín (al sur), el Río Uruguay (al oeste) y un borde casi paralelo al trazado de la Ruta Nacional N° 24 (al este).

Se detallan a continuación los aportes considerados de los trabajos antecedentes, así como la metodología utilizada para relevar los afloramientos, la utilización de los datos

geofísicos para estimar la geología de subsuelo y la interpretación de la información aportada por los perfiles litológicos de perforaciones.

4.4.1 Geología de superficie

Es posible realizar una aproximación a la geología del área de trabajo a nivel general a partir de dos mapas geológicos del territorio uruguayo elaborados ambos a escala 1:500.000 por Preciozzi et al. (1985) y por Bossi et al. (1998). Si bien la escala de estos mapas no es la más adecuada para un estudio local, se tienen en cuenta debido a la falta de afloramientos en la zona.

Asimismo, es posible encontrar trabajos de escala local referentes al estudio de la geología de superficie en seis hojas correspondientes a la Carta Geológica del Uruguay, a escala 1:100.000, publicadas en el año 1990. Si bien ninguna de estas hojas se encuentra dentro de la zona de estudio, se toman en cuenta debido a la cercanía geográfica con el área de trabajo y la similitud litológica y estructural con los registros descritos durante el presente trabajo.

A continuación, se desarrollará la información recolectada a partir de la búsqueda de antecedentes bibliográficos:

Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000 (Preciozzi et al., 1985)

Preciozzi et al. (1985), publican la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000, la cual formó parte del Programa Carta Geológica que desarrolló el Instituto Geológico "Ing. Eduardo Terra Arocena" durante el periodo comprendido entre junio del año 1977 y junio del año 1980. Este documento fue confeccionado y editado por el Instituto Geológico del Uruguay, por lo cual tiene el título de ser la Carta Geológica oficial del país.

Dichos autores definen los siguientes registros para la zona de estudio, ordenados de más antiguo a más reciente:

- **Formación Asencio** (Cretácico Superior): areniscas finas, bien seleccionadas, arcillosas, masivas, de colores blanco y rosado. Presenta procesos secundarios de ferrificación y silicificación, de color rojo herrumbre, con intercalaciones de calizas en algunos sectores.
- **Formación Fray Bentos** (Oligoceno): areniscas muy finas y loess, con porcentaje variable de arena fina, a veces muy arcillosas, masivas, de color naranja. En la base desarrolla niveles lodolíticos, fangolíticos y brechoides.
- **Formación Salto** (Plioceno): areniscas finas a medias de color rojizo, con intercalaciones de niveles fangolíticos y conglomerádicos. Presenta estructuras lenticulares, de estratificación cruzada y/o paralela.
- **Formación Libertad** (Pleistoceno): lodolitas, loess y fangolitas con porcentaje variable de arenas y arcillas, de color pardo a pardo rojizo.
- **Formación Dolores** (Pleistoceno): lodolitas y areniscas arcillosas muy finas, de colores pardos. Su origen es continental, relacionado a fenómenos eólicos y de coluviación, con formación de flujos de barro, que se redepositan en las zonas topográficamente más bajas.
- **Depósitos Actuales:** sedimentos limo-arcillosos, arenosos, a veces conglomerádicos (aluviones y coluviones), depósitos de turbas. Principalmente arenas fluviales, costeras y eólicas.

La distribución de las diferentes unidades en la zona de estudio puede observarse en la Figura 4-4.

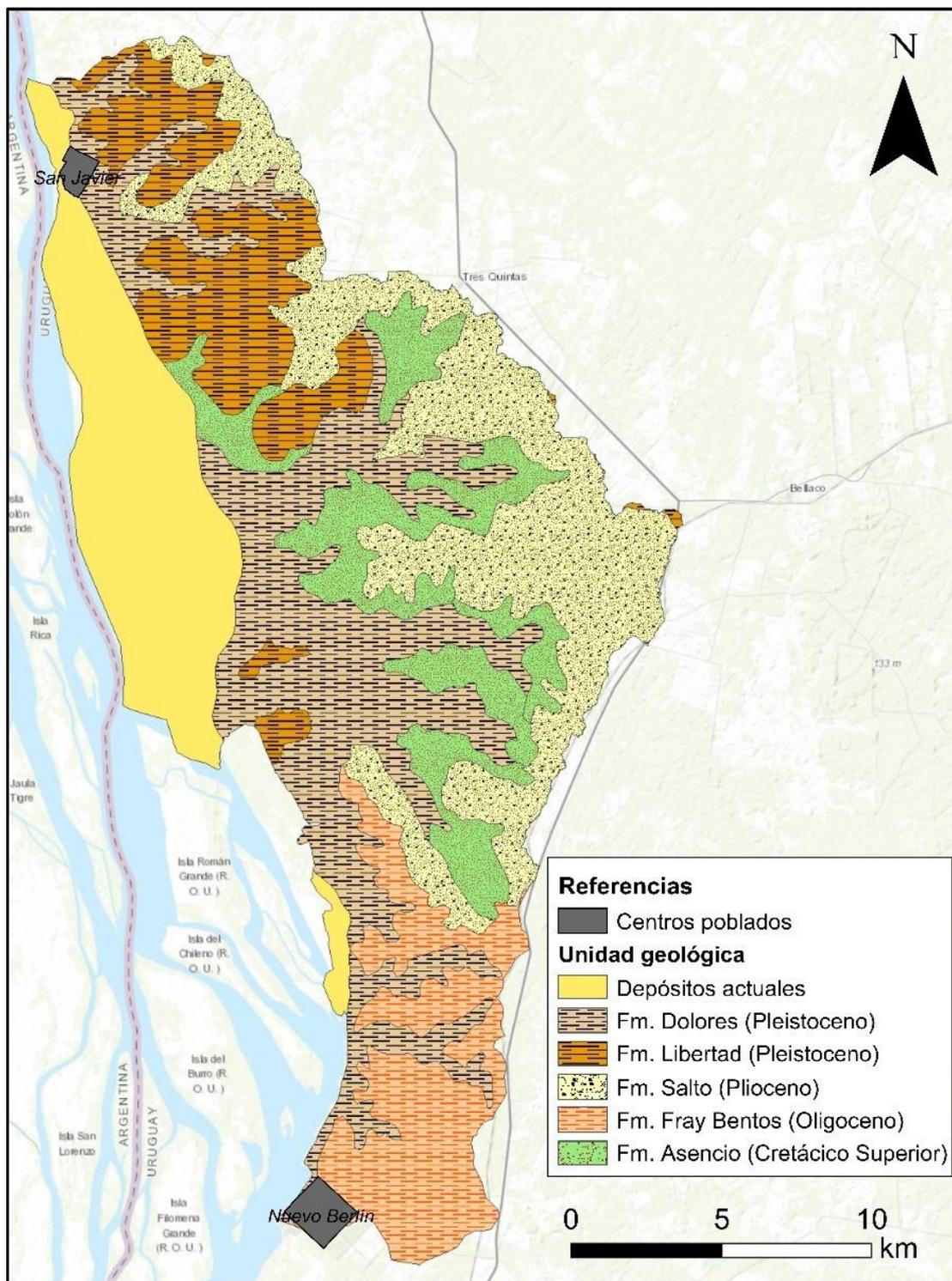


Figura 4-4: Mapa geológico de la zona de estudio (modificado de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000, Preciozzi et al., 1985).

Carta Geológica del Uruguay en la escala 1:500.000 (Bossi et al., 1998)

En el año 1998, Bossi y otros autores, publican por parte de la Cátedra de Geología de la Facultad de Agronomía (Universidad de la República), la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000.

En resumen, los autores describen las siguientes unidades geológicas en la zona de trabajo, ordenadas de más antiguo a más reciente:

- **Formación Fray Bentos** (Oligoceno-Mioceno temprano): diamictitas, areniscas finas, loess y algunos niveles pelíticos, que como carácter unificante poseen un color bastante homogéneo en tonos anaranjados, pardo anaranjados o pardo rosados.
- **Formación Salto** (Plioceno): diamictitas en la base, sobre las que se apoyan areniscas y conglomerados, silicificados o no, que se alternan hasta la cima con neto predominio de las estructuras lenticulares y con estratificaciones cruzadas.
- **Formación Bellaco** (Plioceno): rocas pelíticas macizas, que en la base presentan tonos rojizos dominantes y escasos moteados grises amarillentos, los que varían constantemente hacia la parte superior del perfil donde la relación de tono se invierte e incluso localmente desaparecen los tonos de oxidación. En estas litologías se ha producido la recristalización de yeso en cristales cuyo tamaño en términos generales aumenta hacia abajo, aunque disminuyendo su cantidad. La fracción arcilla de estas pelitas se compone de un 60% de montmorillonita, 30 % de illita y 10% de caolinita.
- **Formación Dolores** (Pleistoceno): consiste en lodolitas masivas y friables de color pardo con locales tonos gris verdosos. La granulometría es variable pero siempre fina, con contenido de limo relativamente constante entre 35 y 47%.
- **Aluviones** (Actual): agrupa una asociación muy heterogénea de materiales sedimentarios acumulados en épocas muy recientes por los actuales cursos de agua.

Es interesante tener en cuenta que los autores describen en la zona de trabajo, la presencia de la Fm. Bellaco, conteniendo cristales de yeso dispersos, los cuales pueden jugar un papel significativo en la hidrogeoquímica del agua subterránea que circula por esta formación.

En la Figura 4-5 es posible observar los registros geológicos existentes en la zona de estudio según Bossi et al. (1998).

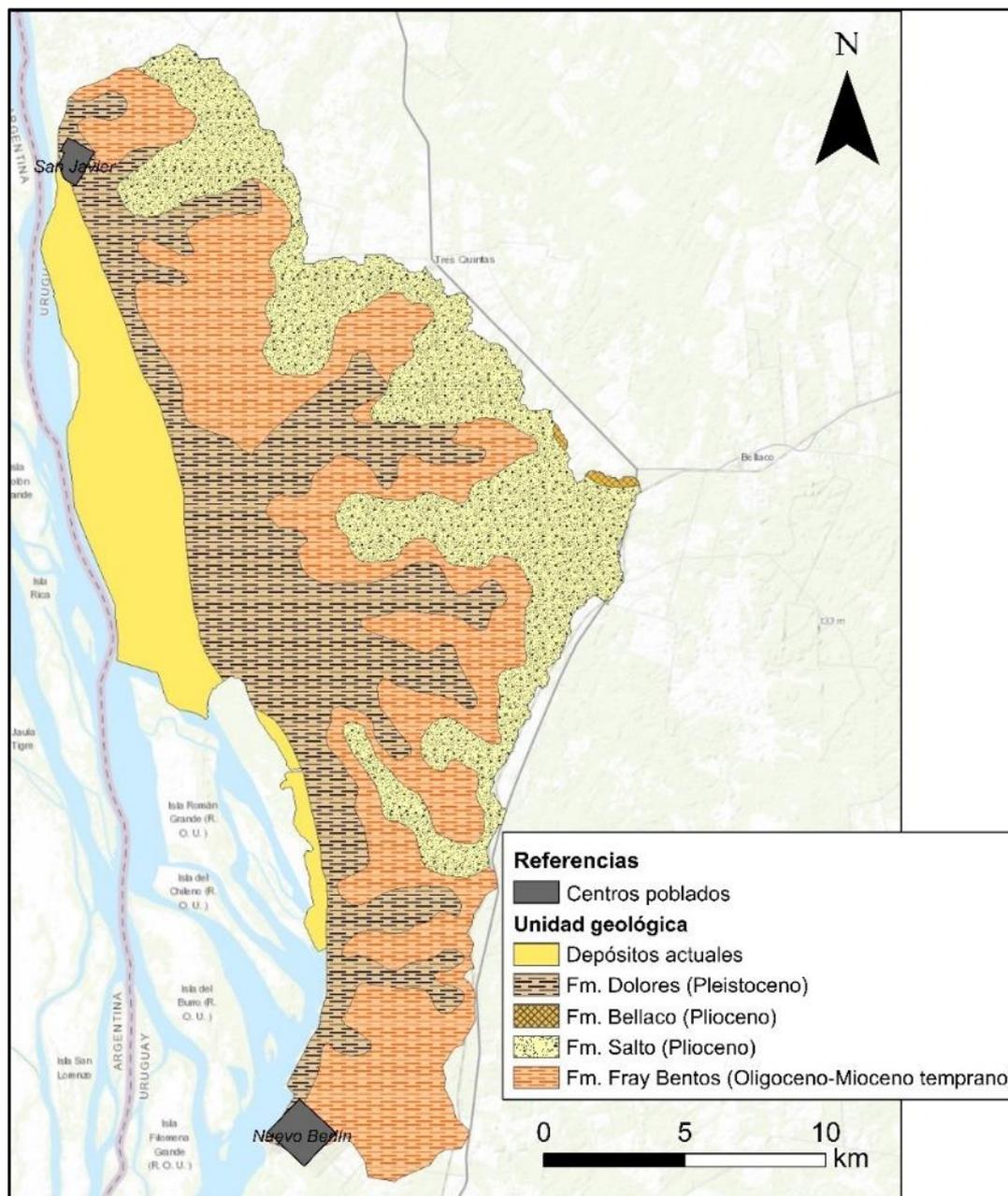


Figura 4-5: Mapa geológico de la zona de estudio (modificado de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000, Bossi et al., 1998).

Carta Geológica del Uruguay a escala 1:100.000 (1990)

Como se expresó anteriormente, se analizaron las hojas N-15 (Gancio y Ford, 1990), N-16 (Ford y Gancio, 1990), N-18 (Ford, 1990), N19 (Ford et al., 1990), O-19 (Morales et al., 1990) y O-20 (Montana et al., 1990) pertenecientes a la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:100.000.

En la Figura 4-6 se muestra la distribución de las hojas y la proximidad de éstas a la zona de trabajo.

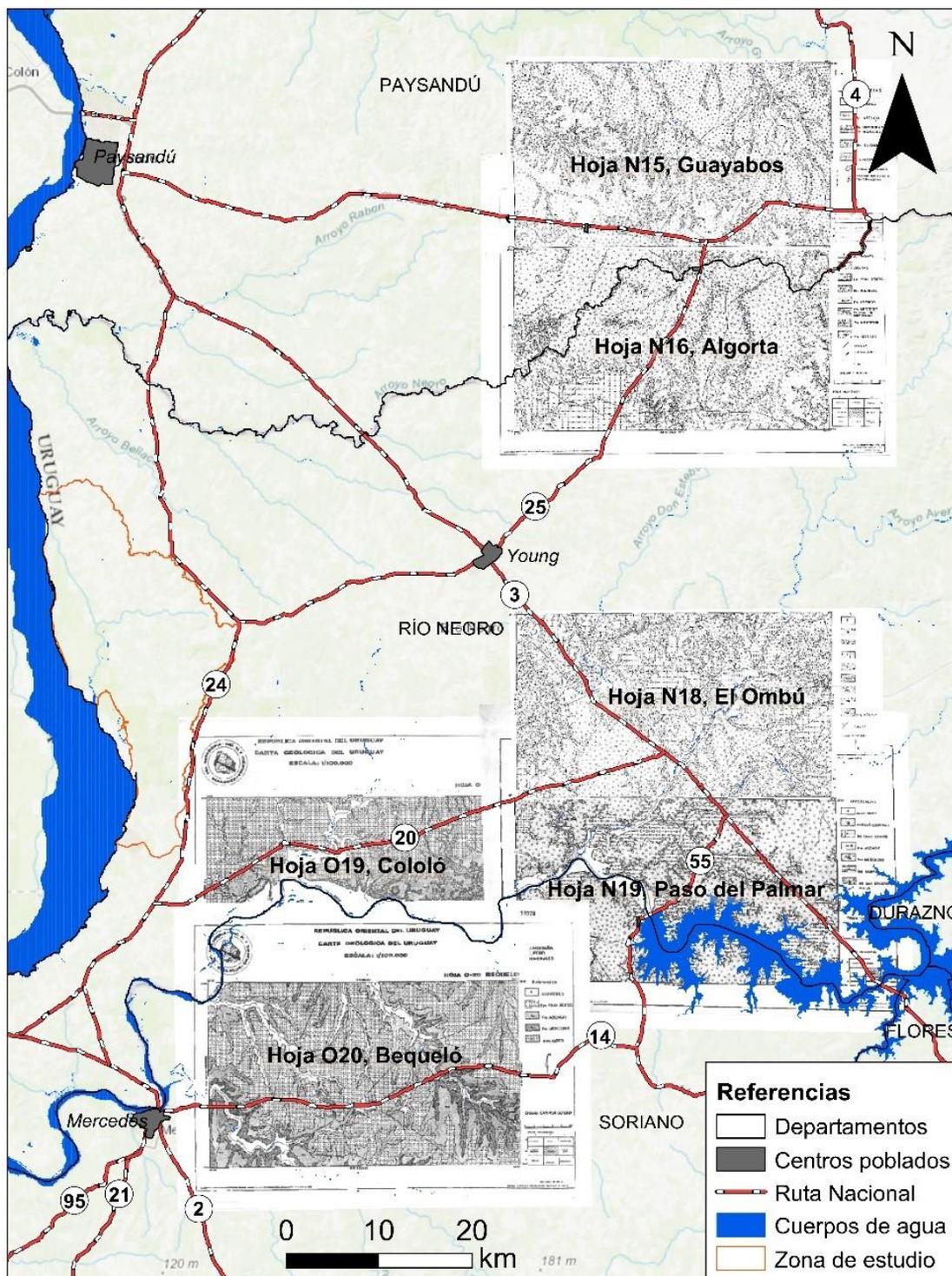


Figura 4-6: Ubicación de las hojas mapeadas en la Carta Geológica del Uruguay esc. 1:100.000, del año 1990.

En los registros geológicos comprendidos dentro de las hojas de referencia, se describe la presencia de las formaciones Arapey, Guichón y Mercedes que no habían sido definidas para la zona de estudio en los trabajos de Preciozzi et al., 1985 y Bossi et al., 1998. Se indican las descripciones de la formaciones Arapey, Guichón y Mercedes según Preciozzi et al. (1985), las cuales serán mencionadas a continuación:

- **Fm. Arapey (Cretácico Inferior):** Lavas básicas del tipo basaltos toleíticos con estructura en coladas. Presenta intercalaciones de areniscas eólicas.

- **Fm. Mercedes** (Cretácico Superior): areniscas medias a conglomerádicas, mal seleccionadas, arcillosas, con estratos silicificados, de estratificación cruzada, de colores blanco y rosado. Presenta intercalaciones de conglomerados, lutitas y calizas. Su génesis corresponde a sedimentación continental fluvio torrencial.
- **Fm. Guichón** (Cretácico Inferior): areniscas finas a medias, bien seleccionadas, estratificación cruzada y/o paralela, de color rojizo. Excepcionalmente niveles conglomerádicos. Su génesis corresponde a sedimentación continental de clima árido.

Carta geológica de las Hojas Topográficas Arroyo Negro y San Javier a escala 1:50.000

Al realizar la recopilación bibliográfica, se encontró una cita sobre un trabajo inédito de los autores Fernando Preciozzi y Jorge Spoturno en el que se define la geología de superficie de las Hojas Topográficas Arroyo Negro y San Javier a escala 1:50.000.

Se realizó la consulta a la Biblioteca y Centro de Documentación Geológica, Energética, Minera y Nuclear del Ministerio de Industria Energía y Minería (MIEM) sobre la existencia de este trabajo en su colección, el cual no fue encontrado en dicho centro. Por lo tanto, no fue posible analizarlo.

De todas maneras, se ubica la cita de Preciozzi y Spoturno (1974) en el capítulo de referencias bibliográficas para una futura búsqueda.

4.4.2 Geología estructural

No es posible encontrar antecedentes respecto a la geología estructural de la zona de estudio en los mapas geológicos de escala 1:500.000 realizados para el territorio uruguayo.

En los trabajos referentes a la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:100.000, se hacen observaciones de la geología estructural en algunas de las hojas cartografiadas.

- Por un lado, en la Hoja N-15 Guayabos se indica que los afloramientos de las diferentes formaciones de origen sedimentario, presentan un basculamiento regional de bloques con buzamiento al SO, y definen que el mismo fue generado por un evento probablemente post-Oligoceno (Gancio y Ford, 1990).
- En la Hoja N-16 Algorta también se hace referencia a un basculamiento de similar naturaleza (al SO) de posible edad post-Oligoceno, y se cartografían lineamientos estructurales con direcciones NO-SE (Ford y Gancio, 1990).
- En la Hoja N-18 El Ombú se cartografían lineamientos estructurales con dirección NO-SE (Ford, 1990), sin especificar su desarrollo en el subsuelo.
- Por último, en la Hoja N-19 Paso del Palmar, los autores reconocen la existencia de fallamientos en el SO de la hoja, con direcciones predominantemente NO-SE, aunque también reconocen, en menor medida, fallas con rumbo NO-SE (Ford et al., 1990).

4.4.3 Relevamiento geológico

El relevamiento de afloramientos se realizó con la finalidad de recolectar información litológica y estructural.

En primer lugar, se georreferenció cada afloramiento. Posteriormente se observan las generalidades del afloramiento, su morfología, relación con el entorno, coloración, y

se identifica el tipo de roca, su estado de alteración, sus estructuras, etc. Se toma nota de las litologías observadas, datos estructurales y se realiza el registro fotográfico. En la Figura 4-7 se muestra la ubicación de los afloramientos relevados.

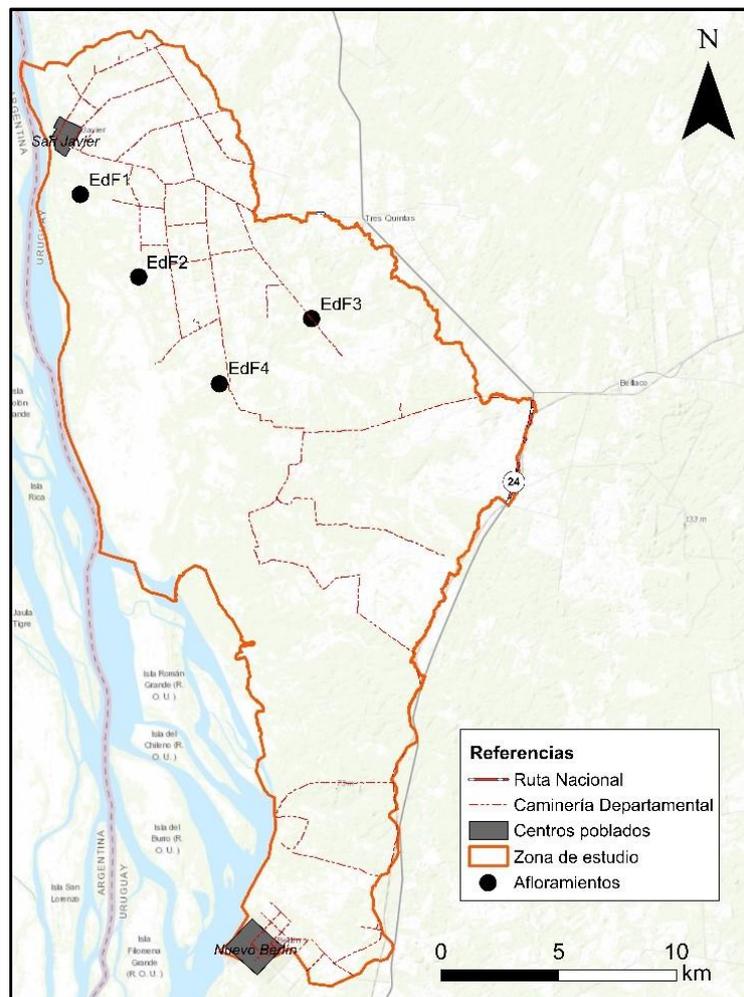


Figura 4-7: Mapa de ubicación de los afloramientos relevados.

4.4.4 Mapa geológico de la zona de estudio

El mapa geológico de la zona de estudio se realizó, en primer lugar, fotointerpretando un total de 13 fotografías aéreas escala 1:40.000, que cubren la totalidad de la zona. Las numeraciones de las fotografías con las cuales se conformó el mapa geológico preliminar son:

- Banda 23, fotografías aéreas desde 207 a 212,
- Banda 24, fotografías aéreas desde 03 al 11,
- Banda 24, fotografías aéreas desde 44 al 50.

Debido a la escasez de afloramientos en esta zona del país, el trazado del mapa geológico fue verificado y corregido con datos de antecedentes y con la información aportada por la información litológica de las perforaciones.

Posteriormente a haber confeccionado el mapa geológico preliminar, se digitalizó el material resultante, con la finalidad de trabajar en un sistema de información geográfica.

4.4.5 Geología de subsuelo

Con el propósito de establecer el modelo físico de la geología de subsuelo, se seleccionaron del banco de datos de perforaciones una serie de perforaciones para abastecimiento de agua subterránea que cuentan con información litológica en detalle (Figura 4-8). Es notorio que las perforaciones utilizadas se concentran en la porción centro-norte de la zona de estudio, por lo que el análisis de la geología del subsuelo se centró en esta fracción del área de trabajo.

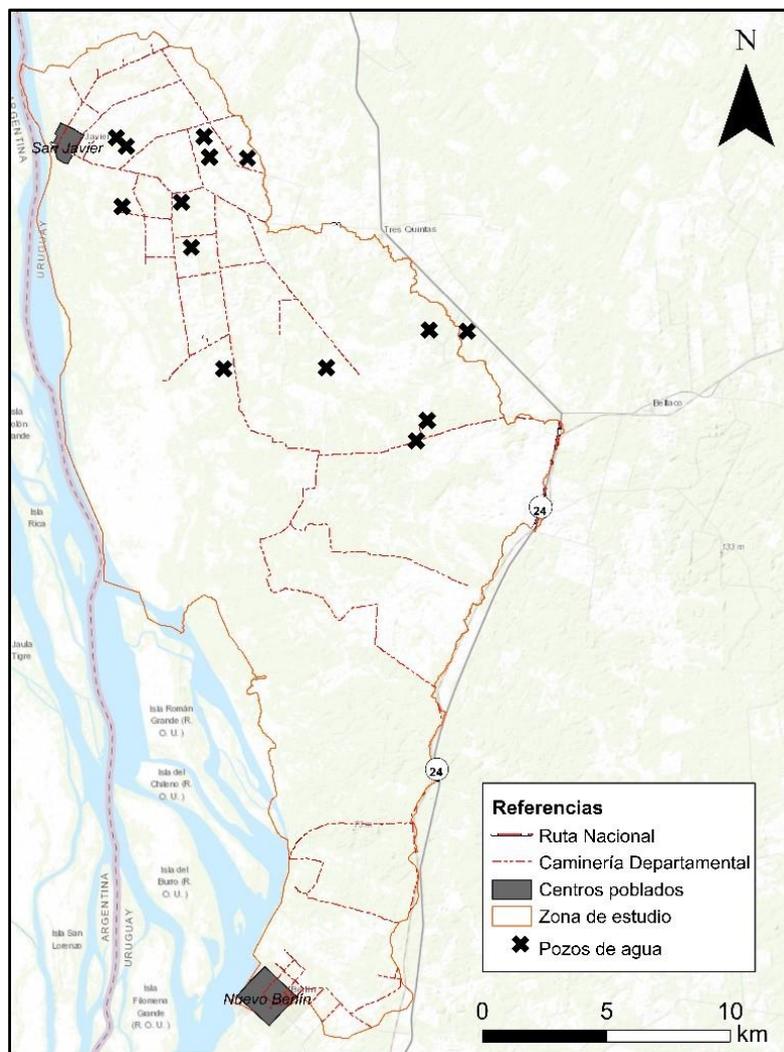


Figura 4-8: Mapa de ubicación de las perforaciones utilizadas para la realización de los cortes geológicos.

La ubicación de los cortes geológicos (Figura 4-9) se definió teniendo en cuenta la densidad de datos de perforaciones, la necesidad de definir la geología de subsuelo en cortes paralelos al eje Y (corte 1) y al eje X (corte 2), ubicando el corte 3 groseramente paralelo a las líneas de flujo según la información piezométrica.

Utilizando las curvas topográficas y la red de drenaje superficial se definió el perfil topográfico de cada corte. Utilizando el mapa de geología de superficie generado en este trabajo se estableció la distribución superficial de las diferentes unidades geológicas.

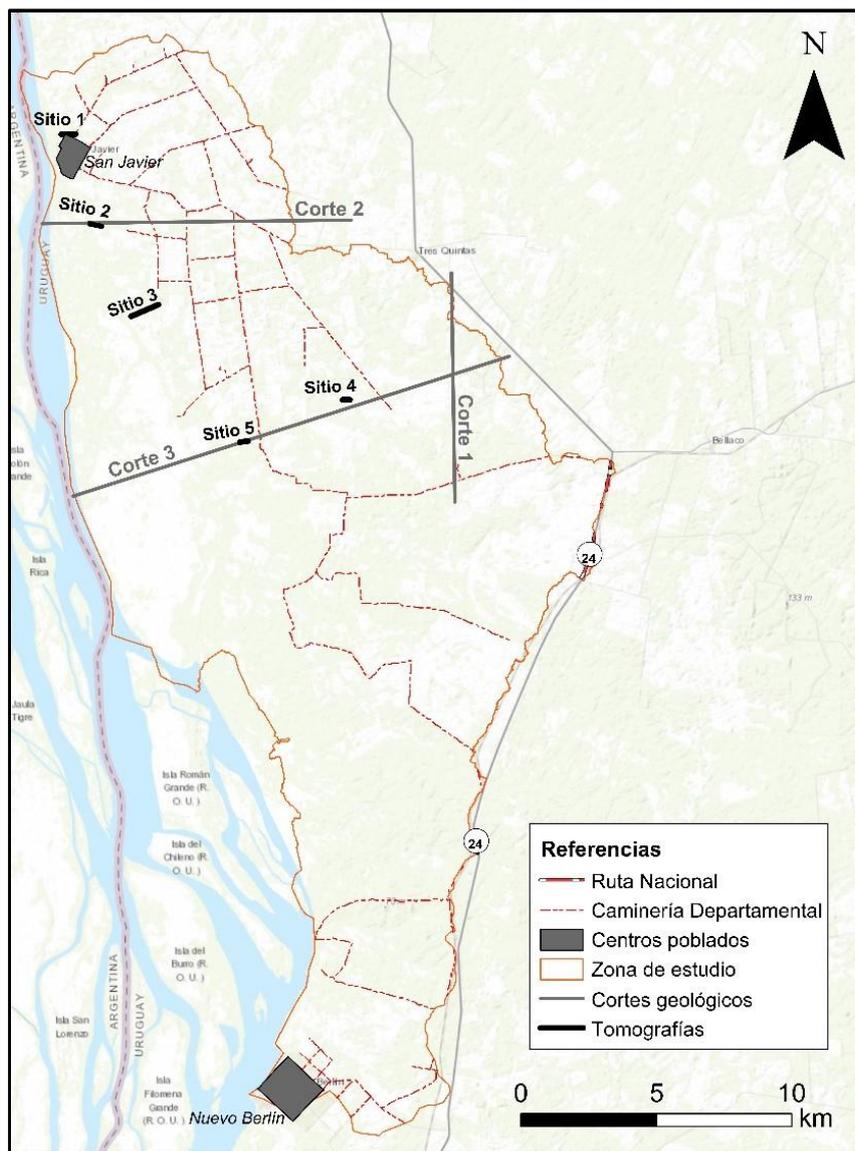


Figura 4-9: Mapa de ubicación de los relevamientos geofísicos y cortes geológicos.

Como forma de completar la información geológica del subsuelo en los cortes en zonas donde no había pozos con descripción litológica, se definieron los sitios donde posteriormente se realizaron las mediciones con métodos geofísicos (ERT y TDEM). Los resultados del relevamiento geofísico fueron utilizados como información complementaria en la elaboración de los cortes.

Como se puede observar en la Figura 4-9, el Sitio 2 de geofísica se corresponde con el trazado del Corte 2, y los Sitios 4 y 5 de geofísica se corresponden con el trazado del Corte 3.

4.4.6 Columna estratigráfica

Con la finalidad de presentar el registro geológico en subsuelo en la zona de estudio, se conforma un bosquejo teórico de columna estratigráfica, donde se identifican las características litológicas de cada formación, las relaciones de contacto entre ellas y su correlación temporal. Cabe aclarar que esta tarea no incluye trabajos de campo de determinación de ninguno de los aspectos antes mencionados, siendo producto únicamente de análisis bibliográfico. Por otro lado, se entiende que los trabajos de

campo de reconocimiento de material geológico aflorante realizados no son suficientes para definir litología y estructuras de las diferentes formaciones, ni para definir las características de contacto entre ellas.

4.5 Geofísica

Los métodos geofísicos permiten determinar de manera rápida, económica y sencilla las propiedades físicas del subsuelo, la estratigrafía de las unidades geológicas, la disposición de heterogeneidades y fallas, el nivel freático, así como propiedades de los suelos y rocas para deducir su comportamiento mecánico. Los métodos geofísicos más utilizados en la actualidad son los métodos gravimétricos, magnéticos, eléctricos y sísmicos.

Para el desarrollo del actual proyecto, se optó por aplicar técnicas geofísicas capaces de aportar información somera, por este motivo los métodos geofísicos empleados fueron la tomografía de resistividad geoeléctrica (ERT) y el transiente electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM).

La ERT en dos dimensiones es un método geofísico que permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo en profundidad y lateralmente (Zuñiga, R. 2011). Se obtienen buenos resultados en áreas con geología o anomalías moderadamente complejas, debido a su mayor amplitud en cuanto a información relevada. Si bien Ramos (2016) plantea que esta metodología es adecuada para la realización de trabajos de detalle a escala local y no para trabajos a escala regional por el volumen de trabajo que implicaría; el objetivo de los trabajos geofísicos es de complementar a la información de geología existente en algunos sitios particulares, reduciendo así el volumen de trabajo.

El propósito de realizar mediciones geoeléctricas es el de determinar mediante mediciones en superficie, la distribución de la resistividad en la subsuperficie (Loke, 2004).

La técnica consiste en medir la resistividad aparente (RA) del subsuelo mediante un dispositivo tetraelectródico determinado y con una separación constante entre electrodos. El dispositivo permite ir variando las distancias entre los pares de electrodos emisor- receptor por múltiplos de un valor determinado "n", en dependencia del arreglo geométrico seleccionado, de forma tal que el resultado final será una sección de RA a varios niveles "n" de profundidad. Tales mediciones se efectúan comúnmente usando un número variable de electrodos, dependiendo de la profundidad a la que se desee explorar el subsuelo, conectados a un cable multinúcleo. Una microcomputadora portátil junto con un conmutador electrónico se usa para seleccionar automáticamente los cuatro electrodos correspondientes a cada medida.

Los arreglos electródicos empleados en las ERT fueron Wenner Alpha, Beta, Gamma y Schlumberger.

El principio del método TDEM consiste en hacer circular una corriente por una bobina transmisora (Tx) que genera un campo magnético primario estable en el subsuelo. Cuando se interrumpe de forma instantánea dicha corriente (y por tanto cesa el campo magnético primario), el campo electromagnético inducido en el subsuelo causa corrientes parásitas (EMF), que se propagan a través de éste. Como consecuencia de pérdidas de energía debido a la resistencia eléctrica del medio, estas corrientes disminuyen con el tiempo, provocando un campo magnético secundario decreciente en

la superficie. Esta variación del campo magnético secundario, por fenómenos de inducción, puede ser medido desde la superficie utilizando una bobina o lazo receptor (Rx)".

Mayor detalle del fundamento teórico de las técnicas geofísicas empleadas se encuentra en el Anexo 10.2.1

4.5.1 Información antecedente

Los antecedentes geofísicos en la zona de estudio fueron realizados en los proyectos antes mencionados Corbo et al. (2014) y De los Santos et al. (2020). Las mediciones geofísicas que se realizaron dentro de la zona de estudio corresponden a 9 sondeos audio magnetoteléuticos (AMT-MT). No se encontraron antecedentes con información geofísica somera de detalle. En la Figura 4-10 se muestra la ubicación de los sondeos mencionados.

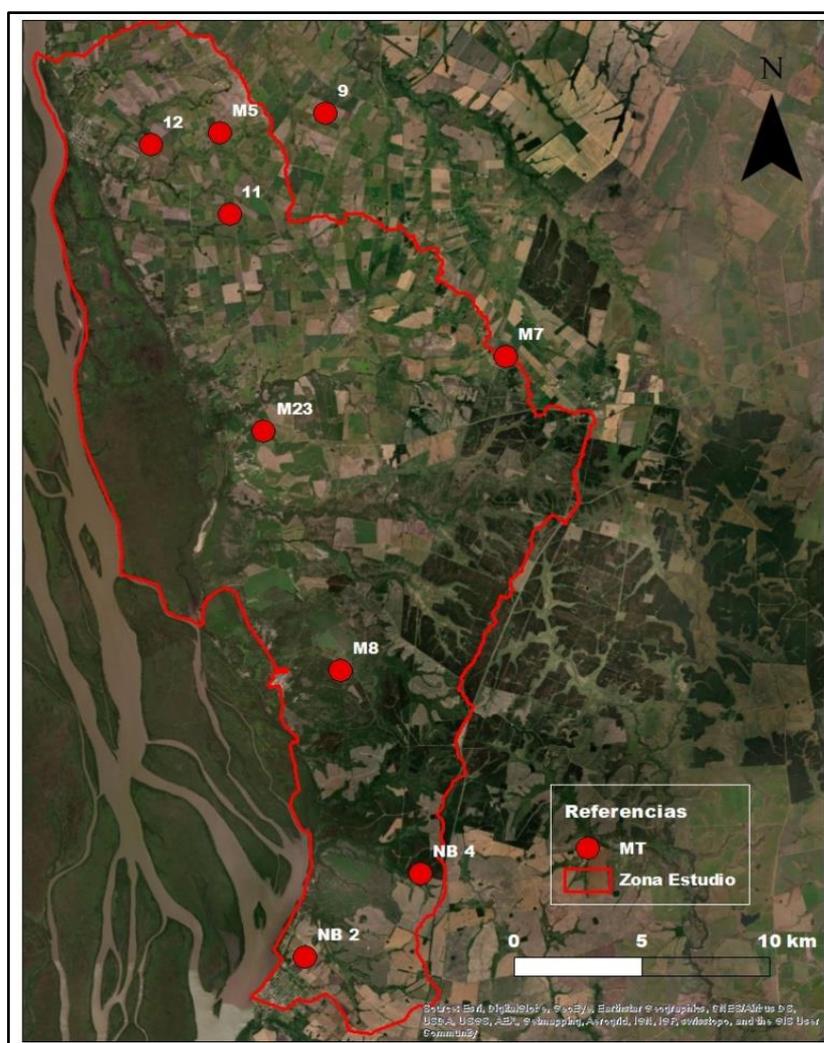


Figura 4-10: Sondeos AMT-MT antecedentes en la zona de estudio.

Los sondeos AMT-MT se plantearon para estudios de profundidad por lo que pierden detalle para la profundidad requerida en este estudio. Por este motivo no fue posible hacer uso de estos estudios para los cortes realizados.

4.5.2 Relevamiento geofísico

A partir del análisis geológico de la zona de estudio se definieron sitios donde se requería información adicional a la existente. El relevamiento geofísico se realizó en seis sitios de la zona de estudio. Se utilizó un tomógrafo modelo GD-10 fabricado por Geomative y un TDEM modelo AIE-2 marca ELGEO Ltd.

Debido a que los métodos geofísicos son métodos indirectos, es importante calibrar cada método en cada zona de estudio con información de perforaciones donde se cuente con el perfil litológico. El primer relevamiento geofísico se realizó en la ciudad de San Javier cercano a la perforación de OSE como mecanismo de calibración. En este sitio no se pudo realizar un sondeo TDEM, debido a la existencia de tendidos eléctricos en la zona que imposibilitan la realización del sondeo. A partir de la ERT paramétrica en San Javier, se definió la resistividad correspondiente a cada formación sedimentaria (Fm. Salto, Fm. Fray Bentos y Fm. Mercedes). Sin embargo, debido a la información con la que se contaba, esta parametrización no tiene peso estadístico. Los sitios con relevamiento geofísico se muestran en la Figura 4-11.

El sitio 2 se encuentra en la transecta del corte 2 en la posición más próxima a los humedales. La realización de la ERT en este sitio permitiría evaluar el perfil geológico próximo al humedal.

En el sitio 3 se realizaron mediciones de ERT debido a que existían indicios de afloramientos de litologías subyacentes a las mapeadas en estudios antecedentes como Preciozzi et al. (1985) y Bossi et al. (1998).

Los sitios 4 y 5 se seleccionaron teniendo en cuenta la falta de información existente en el trazado del corte 3.

El sitio 6 se realizó porque se encuentra una perforación surgente en una zona muy próxima al humedal.



Figura 4-11: Sitios de relevamientos geofísicos.

Para el sitio 1 se realizó una ERT de 590 metros con separación entre electrodos de 10 metros. Esta elección se debe al detalle esperado y a la profundidad requerida de investigación.

En los sitios 2 y 3 la separación entre electrodos también fue de 10 metros obteniéndose perfiles de 470 metros.

En el sitio 4 la transecta de estudio fue de 235 metros y separación entre electrodos de 5 metros porque se requería mayor detalle y menor profundidad de investigación.

En los sitios 5 y 6 la separación entre electrodos fue de 6 metros obteniéndose perfiles de 282 metros.

Los TDEM realizados fueron 4, coincidentes con los sitios 2, 3, 5 y 6. En los sitios 1 y 4 no fue posible realizar el relevamiento mediante TDEM debido a las líneas de corriente eléctrica existentes en la zona lo que provoca mala calidad de los datos adquiridos. Los lazos realizados fueron de 50 y 100 m de lado.

4.6 Piezometría

Los mapas piezométricos aportan información sobre el comportamiento hidráulico del acuífero. Permiten identificar direcciones y trayectorias de flujo, posibles zonas de recarga y descarga, así como evidenciar posibles interacciones entre la hidrología superficial y el acuífero.

4.6.1 Información antecedente

Como antecedente en el área se cuenta con un mapa piezométrico del Sistema Acuífero Mercedes (SAM) (De los Santos et al., 2020). La piezometría muestra que las áreas de recarga se insinúan al noreste y sudeste y las descargas se producen hacia los cauces superficiales como Río Uruguay, Río Negro, Arroyo Negro, Arroyo Grande del Sur entre los más importantes (Figura 4-12).

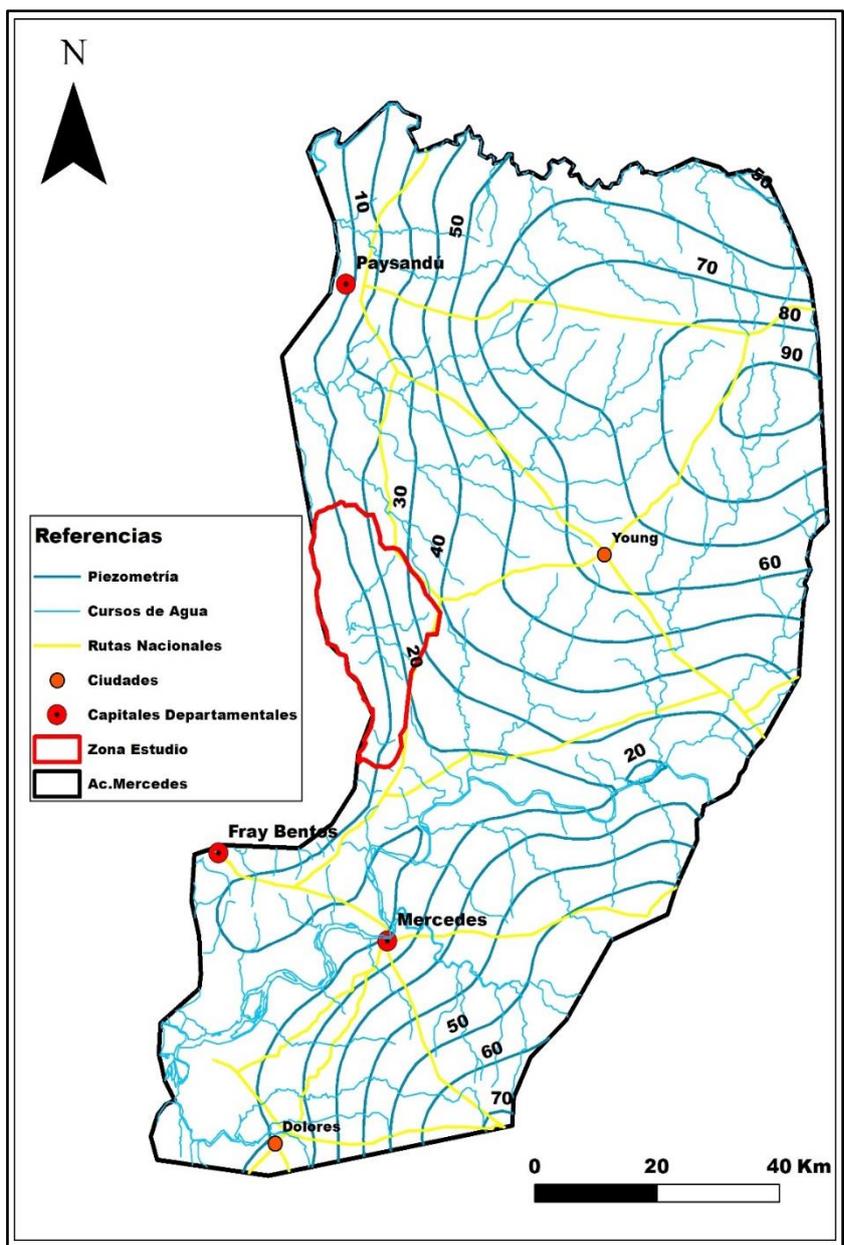


Figura 4-12: Piezometría - mayo 2016 (Fuente: De los Santos et al., 2017).

El área de estudio actual representa una pequeña porción en comparación a los 11500 km² que abarca el SAM, por lo que fue necesario realizar un relevamiento piezométrico con mayor detalle para conocer la interacción local del acuífero con los esteros y sus cursos de agua afluentes.

4.6.2 Relevamiento piezométrico

En febrero de 2018 se llevó a cabo una campaña de medición de niveles estáticos, con el correspondiente georreferenciamiento con GPS diferencial de cada sitio relevado. Se conformaron dos equipos técnicos contando con el apoyo logístico del IMFIA - Facultad de Ingeniería y el SNAP a través de su sede en San Javier.

Se realizó un grillado del dominio en polígonos cuadrados de 2.5 km de lado con el objetivo de identificar y relevar al menos un pozo en cada grilla. En total se relevaron un total de 87 pozos y 12 puntos de control en cauces superficiales. La inaccesibilidad a campos forestales, que cubren una superficie importante en el área de estudio, dejó algunos vacíos de información. La Figura 4-13 muestra la grilla y los puntos relevados.

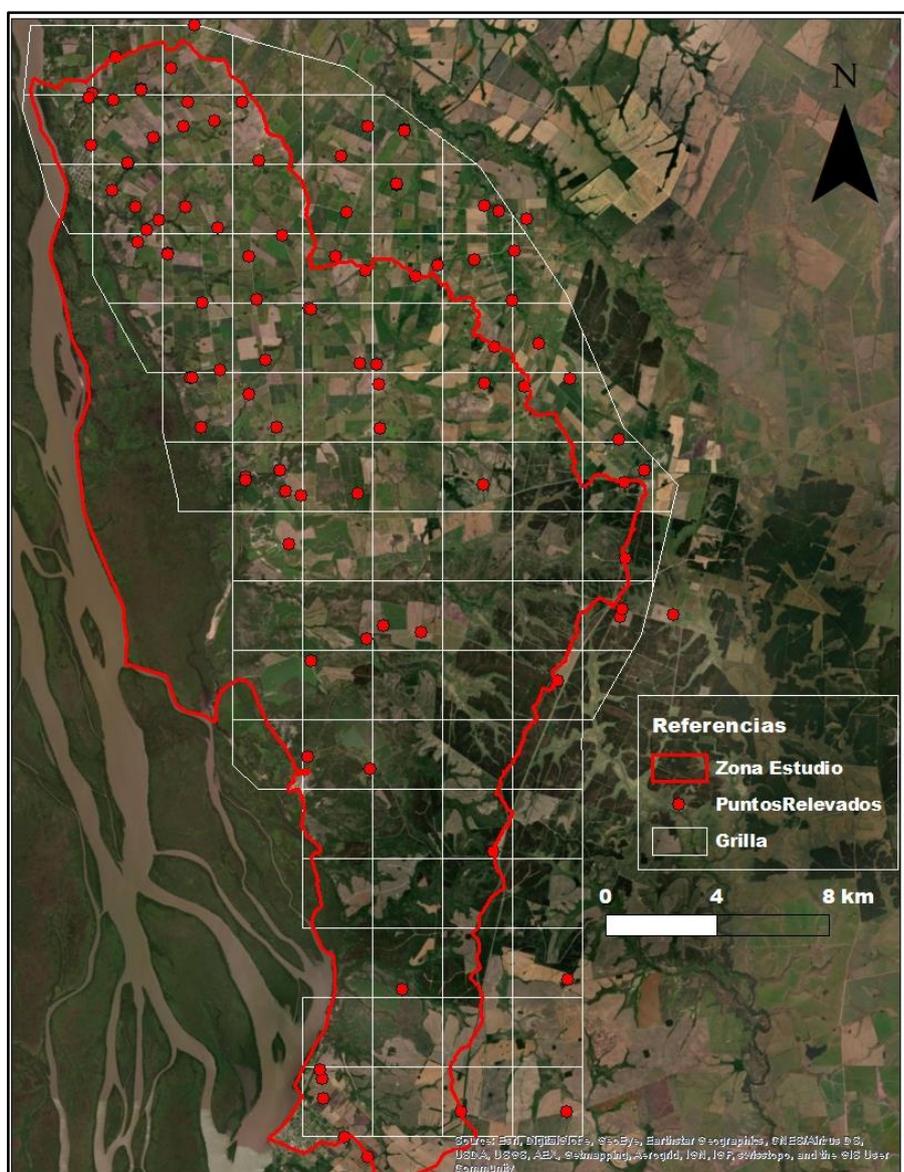


Figura 4-13: Perforaciones relevadas en la campaña de medición de niveles en febrero de 2018.

4.6.3 Procesamiento de datos

Con el objetivo de generar un mapa piezométrico mediante interpolación de los datos puntuales relevados, se realizó un análisis exploratorio de los datos de niveles piezométricos.

El objetivo del análisis exploratorio de los datos es caracterizar a la muestra tratando de obtener la mayor información posible sobre el comportamiento de la variable, imprescindible para realizar correctamente cualquier análisis estadístico y en particular, un análisis geoestadístico.

Inicialmente se contaba con 99 datos relevados, de los cuales se eliminaron aquellos puntos con incidencia de bombeo y valores atípicos, quedando la muestra en 69 datos.

Para validar el análisis geoestadístico la muestra debe cumplir algunos requisitos, como ser que la muestra no se vea afectada por valores anómalos u outliers, que su distribución de probabilidad sea normal; que no exista tendencia en los datos y que la población tenga una distribución espacial homogénea. Del análisis exploratorio de los datos de niveles piezométricos se observó que presentaban tendencia espacial en la dirección Este - Oeste.

Para eliminar la tendencia se ajusta la media (deriva) utilizando un polinomio de primer orden y posteriormente se trabaja con los datos residuales, los cuales, a diferencia de los datos originales, debe presentar una distribución semejante a la normal

Mediante un análisis estructural se buscó identificar una función que describa el grado de correlación espacial de la variable analizada. En este caso se utilizó la función del semivariograma.

Finalmente, la interpolación de la piezometría se realizó mediante Kriging ordinario utilizando los parámetros obtenidos en las etapas anteriores.

4.7 Hidroquímica e Isotopía

La interpretación hidrogeoquímica es una herramienta valiosa para analizar sistemas hidrológicos de vinculación compleja. Esta técnica permite identificar distintos tipos de agua, interacción y mezcla entre ellos, y posibles procesos modificadores a lo largo de líneas de flujo mediante el análisis del contenido y variación de las especies iónicas (Martínez et al., 2000). La aplicación de técnicas isotópicas en los estudios hidrogeológicos ha demostrado ser otra importante herramienta en la validación y ajuste de modelos conceptuales (Clark y Fritz, 1997; Mazor, 1997; Fontes, 1980). Los procesos físicos y los fenómenos meteorológicos responsables del transporte del agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico producen un fraccionamiento isotópico que puede ser aprovechado para obtener conclusiones sobre su origen y comportamiento. En el presente trabajo se buscó utilizar ambas técnicas como herramientas que permiten generar información para determinar de manera precisa el modelo hidrogeológico de la zona, y el vínculo entre aguas subterráneas, aguas del humedal y aguas de los cursos superficiales de la cuenca.

No existen antecedentes publicados de estudios hidrogeoquímicos e isotópicos en el Parque Nacional Esteros de Farrapos (PNEF).

En el trabajo De los Santos et al. (2020) se realizó un muestreo hidrogeoquímico de iones mayores y metales trazas en 10 pozos que extraen agua del SAM, uno de ellos se

emplaza sobre la zona de estudio de este trabajo. En el presente trabajo se utilizó la información hidrogeoquímica de dicha perforación y se complementó la misma con un análisis de oxígeno 18 y deuterio.

Se utilizó la información geológica de base y la piezometría obtenida a partir de las campañas de mediciones de niveles realizadas para determinar una red de muestreo para la hidroquímica y la isotopía, considerando los objetivos planteados con el presupuesto disponible para ejecutar el trabajo.

Se utilizaron diversas herramientas hidroquímicas para analizar la información obtenida. Se graficaron diagramas de Piper, Schöeller Berkloff y de Stiff con las concentraciones de los iones mayoritarios expresadas en meq/L de las 14 muestras. Se elaboraron mapas de cloruros y sodio y se analizaron distintas relaciones iónicas.

4.7.1 Red de muestreo

Se seleccionó una red de muestreo de 14 puntos. Compuesta por siete pozos de agua subterránea que captan de diferentes formaciones sedimentarias que componen el sistema de flujo (Figura 4-14). Además, dentro de la red se seleccionaron cuatro cursos de agua menores, dos lagunas semipermanentes y una muestra tomada a 1 metro de profundidad en la zona de humedales. Ver Figura 4-15.

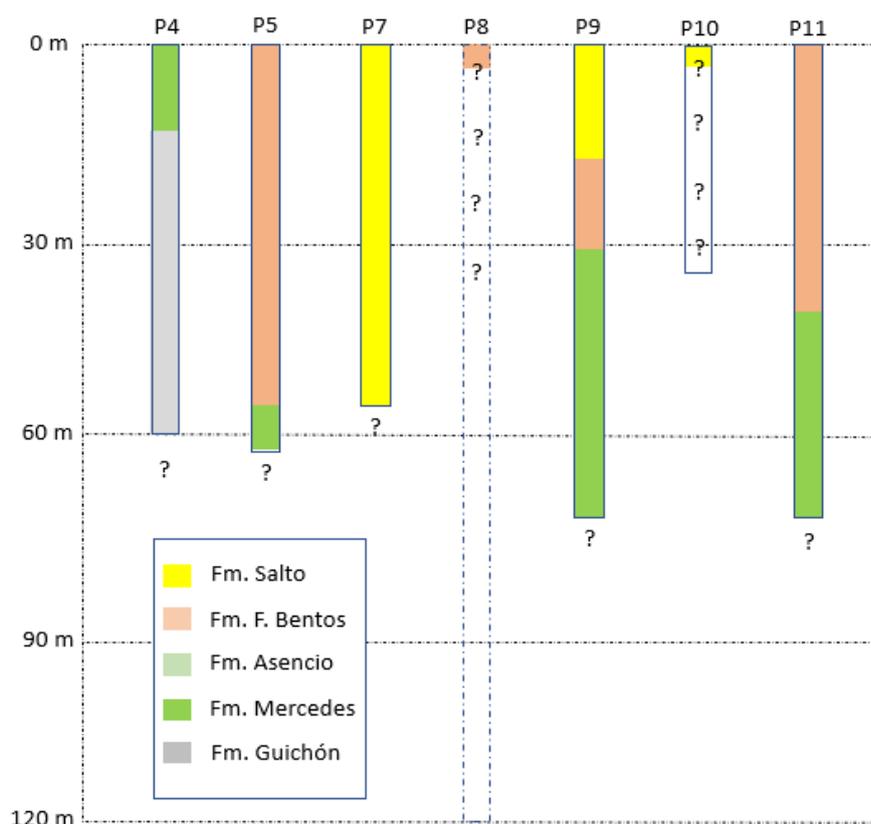


Figura 4-14: Perfiles de pozos muestreados.

Estos datos representan la primera caracterización hidroquímica e isotópica del sistema hidrogeológico del PNEF. El escaso registro de información de perfiles de pozos y la disponibilidad limitada de fondos para las campañas de hidroquímica e isotopía condicionaron la selección de puntos de muestreo. Las perforaciones se seleccionaron

teniendo en cuenta aspectos muy básicos como su distribución geográfica respecto a las líneas de flujo, la posibilidad de acceso al sitio para recoger las muestras de agua y el perfil litológico y constructivo. Pese a que no se cuenta con información del perfil litológico del P8 y P10, se optó por muestrear estas perforaciones debido a que no se encontraron otras con perfil litológico aptas para muestreo.

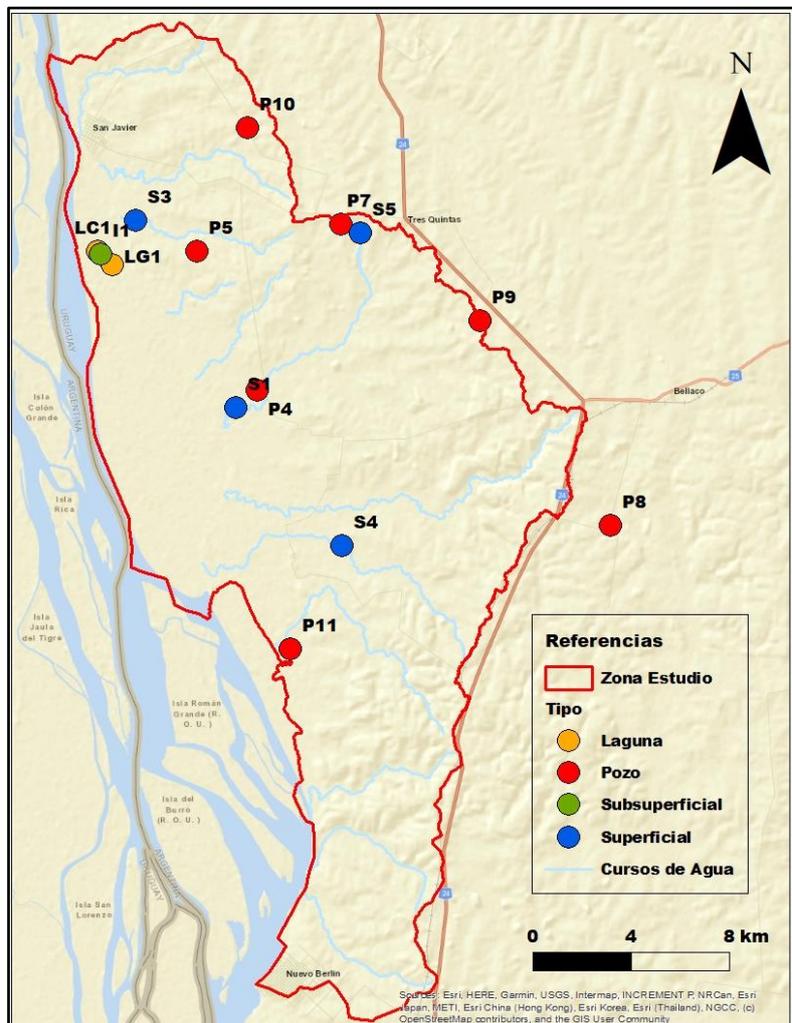


Figura 4-15: Sitios muestreados para hidroquímica.

4.7.2 Recolección, conservación y transporte de muestras

La campaña de muestreo se realizó entre los días 15 y 17 de abril del año 2019. El primer día se muestrearon los pozos y cursos de agua de la región norte del área de estudio. Es de destacar que, si bien se venía de un período de escasas precipitaciones, en el primer día de muestreo se dio un episodio de lluvias con un acumulado de 5 mm según el registro de la estación San Javier (INUMET). En la Figura 4-16 se muestran los acumulados de precipitación mensuales hasta la fecha de muestreo. En abril de 2019 se presentan los valores acumulados a la fecha de muestreo (15/4/2019). El promedio anual mensualizado fue calculado para el periodo de datos 2010 -2018.

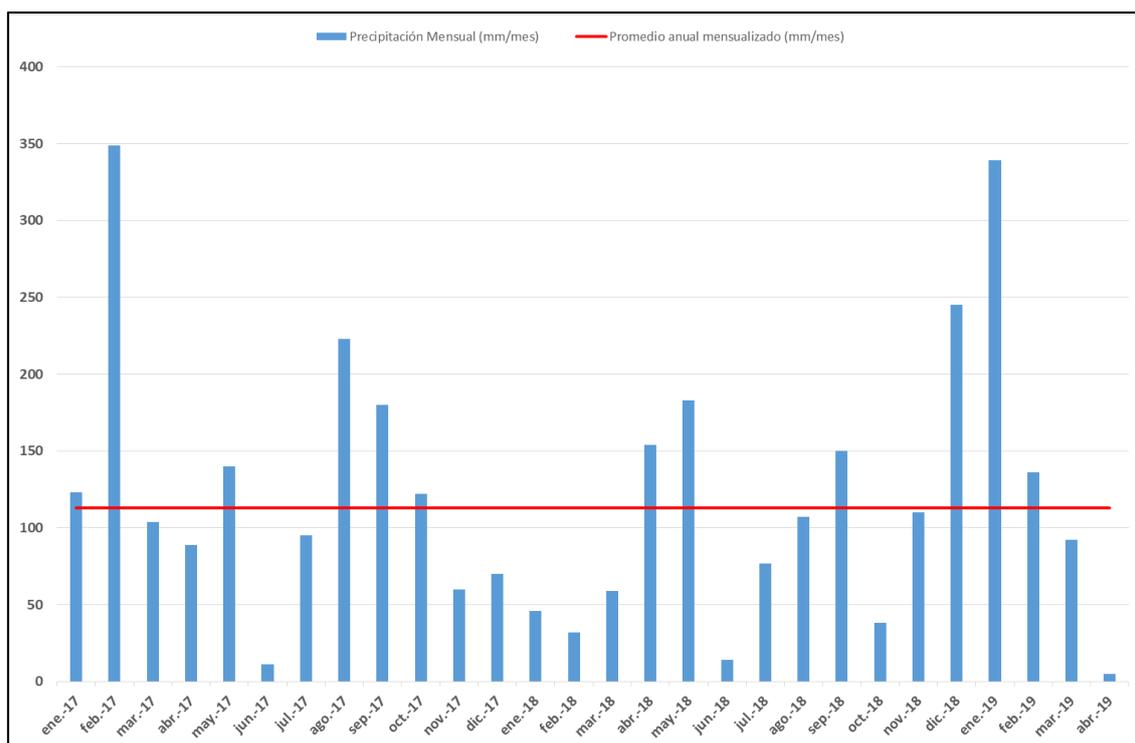


Figura 4-16: Acumulados mensuales de precipitación para los 2 años previos al período de muestreo (abril 2019).

El segundo día se ingresó embarcado por el Río Uruguay a la zona de humedales y se muestrearon las lagunas y zonas interlagunares, además se realizaron medidas de conductividad eléctrica en diferentes zonas de las lagunas y del humedal. En el tercer día se muestrearon algunos cursos de agua y pozos de la región sur del área de estudio.

En cada punto de muestreo se extrajeron 4 muestras, una para medir alcalinidad en un laboratorio nacional, otras dos para medir aniones, metales y cationes en un laboratorio internacional (ActLabs, Canadá) y otra para determinar isótopos estables en un laboratorio en Argentina. También se midió en cada punto la conductividad eléctrica, temperatura y pH del agua in situ. Se utilizó para esto una sonda de campo multiparamétrica Hanna Combo.

La recolección y conservación de las muestras se realizó teniendo en cuenta las especificaciones de muestreo y conservación dispuestas por los laboratorios analíticos intervinientes y por la guía de buenas prácticas para la recolección de muestras de agua subterránea publicada por la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA). La metodología detallada de muestreo se puede ver en el Anexo 10.3.1.

Las muestras destinadas a medir alcalinidad se derivaron antes de las 24 horas de haberse recolectado a un laboratorio nacional. Las muestras destinadas a medir aniones, cationes y metales se enviaron al laboratorio Actlabs de Canadá, antes de los 30 días de extracción. Las muestras destinadas a medir la concentración de isótopos estables se conservaron según lo dispuesto por los técnicos del Instituto de Geología y de Costas del Cuaternario de Mar del Plata, Argentina, donde se enviaron a analizar el día 2 de mayo del 2019.

4.7.3 Análisis de laboratorio y técnicas analíticas

En el laboratorio LAAI de Uruguay se analizó la alcalinidad de las muestras extraídas utilizando la metodología analítica Standard Method 2320 B, 22 nd ed. 2012.

En el laboratorio ActLabs de Ontario, mediante ICP-MS (Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo) se determinaron 67 elementos (Na, K, Ca, Mg, Li, Be, Al, Si, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Pt, Au, Hg, Ti, Pb, Bi, Th y U). Por cromatografía de iones se determinó el contenido en F, Cl, NO₂, Br, NO₃, PO₄ y SO₄ disueltos. Cuando se superaron los límites superiores de detección por ICP-MS se analizaron por ICP-OES (Espectroscopía de emisión óptica de Plasma Acoplamiento Inductivo), que permite determinaciones en soluciones con mayor concentración iónica.

En el laboratorio argentino del Instituto de Geología y de Costas del Cuaternario de Mar del Plata, se analizaron los contenidos de oxígeno 18 y de deuterio de las muestras enviadas, utilizando espectroscopia láser con una precisión de 0,15 ‰ para δ¹⁸O y de 1,0 ‰ para δ²H.

4.7.4 Calidad de los análisis

El agua 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.

Como mecanismo de control de calidad de los análisis se estimó el porcentaje de error en el balance de carga iónica para cada muestra, en función de la siguiente expresión:

$$error = \frac{\sum Cationes - \sum Aniones}{\sum Cationes + \sum Aniones} * 100$$

Donde las concentraciones están en meq/L o unidad proporcional equivalente.

5 Resultados

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos de la aplicación de las metodologías detalladas en el capítulo anterior.

5.1 Banco de datos de perforaciones

Del análisis de la información aportada por las diferentes fuentes en cuanto al perfil geológico, datos hidráulicos y constructivos de los pozos que se encuentran en el área de estudio, pueden resumirse las siguientes observaciones:

- Profundidad
 - Mínima: 23 m.
 - Máxima: 163 m.
 - Promedio: 57 m, habiendo únicamente 4 pozos que superan los 100 m de profundidad.
- Formaciones geológicas que aportan agua:
 - Fm. Salto
 - Fm. Fray Bentos
 - Fm. Asencio
 - Fm. Mercedes
 - Fm. Guichón

Como nota a este listado, es apropiado indicar que:

- La Fm. Salto no presenta importancia considerable como unidad acuífera comparada con las demás formaciones.
- Algunos pozos extraen agua únicamente de la Fm. Fray Bentos, con caudales específicos del orden de $0.45 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.
- Una gran cantidad de pozos alcanzan la Fm. Mercedes, formación acuífera predominante en la zona.
- Una escasa cantidad de pozos finalizan en litologías que se pudieran asociar con la Fm. Guichón. Debido a la falta de datos y de antecedentes en la zona, no es posible asociar esta formación con un caudal extractivo.

- Tipos de acuíferos:

Se describen las características litológicas de cada formación con la finalidad de estimar el comportamiento hidrogeológico de cada una de ellas:

Fm. Salto: Areniscas finas a medias de color rojizo, con intercalaciones de niveles fangolíticos y conglomerádicos. Estructura lenticular, de estratificación cruzada y/o paralela (Preciozzi et al., 1985).

Si bien las litologías definidas dentro de la Fm. Salto (sobre todo los niveles conglomerádicos) pudiera darle a esta unidad condiciones para ser un acuífero productivo, no presentan este comportamiento en la zona de estudio.

Fm. Fray Bentos: Areniscas muy finas y loess, con porcentaje variable de arena fina, a veces muy arcillosas, masivas, de color naranja. En la base desarrolla niveles lodolíticos, fangolíticos y brechoides (Preciozzi et al., 1985).

Teniendo en cuenta las litologías que definen esta formación, es posible estimar que su comportamiento hidrogeológico se asemeja al de un acuitardo, llegando a actuar como acuícludo en algunos sectores. Sin embargo, en función de la información de las perforaciones, se le puede asignar carácter de acuífero.

Fm. Asencio: areniscas finas, bien seleccionadas, arcillosas, masivas, de colores blanco y rosado. Presenta procesos secundarios de ferrificación y silicificación, de color rojo herrumbre, con intercalaciones de calizas (Preciozzi et al., 1985).

Si bien esta formación está compuesta por litologías que podrían otorgarle un comportamiento hidrogeológico considerable, éste pudiera presentar variaciones debido a la presencia de cementación.

Fm. Mercedes: areniscas medias a conglomerádicas, mal seleccionadas, arcillosas, con estratos silicificados, de estratificación cruzada, de colores blanco y rosado. Presenta intercalaciones de conglomerados, lutitas y calizas. Su génesis corresponde a sedimentación continental fluvio torrencial (Preciozzi et al., 1985).

De manera similar a como ocurre con la Fm. Asencio, es posible concebir a la Fm. Mercedes en base a su litología como una formación acuífera. En cambio, esta definición puede presentar variaciones debido a la presencia de cemento silicio en diferentes estratos, el cual reduciría su capacidad de transporte de agua, además de otorgarle la característica de acuitardo en diferentes estratos.

Cabe aclarar que tanto la Fm. Asencio como la Fm. Mercedes forman parte del Sistema Acuífero Mercedes (SAM), con desarrollo muy importante en esta zona del país.

Fm. Guichón: areniscas finas a medias, bien seleccionadas, estratificación cruzada y/o paralela, de color rojizo. Excepcionalmente niveles conglomerádicos (Preciozzi et al., 1985).

De acuerdo a la litología, se define a la Fm. Guichón como una formación acuífera.

5.2 Geología

Se desarrolla en este capítulo los resultados del análisis de la información antecedente, se detallan los datos obtenidos del relevamiento geológico de afloramientos. También se presentan el mapa geológico en detalle de la zona de estudio y los cortes geológicos realizados. Con la finalidad de plasmar la relación temporal del registro geológico definido, se elabora la columna estratigráfica para la zona de estudio, a partir de la bibliografía de referencia.

5.2.1 Geología de superficie

Si bien Preciozzi et al. (1985) y Bossi et al. (1998) describen, a grandes rasgos, litologías similares dentro de la zona de estudio, la distribución de las unidades y su nomenclatura varía según los autores.

- Bossi et al. (1998) mapean las formaciones Fray Bentos, Salto, Bellaco, Dolores y los depósitos actuales definidos como Aluviones.
- Preciozzi et al. (1985) cartografiaron las formaciones Asencio, Fray Bentos, Libertad, Dolores, Salto y los Depósitos Actuales en sentido amplio.

De las hojas comprendidas dentro de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:100.000 (1990), es posible extraer la siguiente información:

- En la Hoja N-15 Guayabos, ubicada al NE de la zona de trabajo, se cartografían las Formaciones Arapey, Guichón, Mercedes, Asencio y depósitos actuales.
- En la Hoja N-16 Algorta, ubicada al S de la anterior, se cartografían las formaciones Guichón, Mercedes, Asencio, Fray Bentos y depósitos actuales.
- En la Hoja N-18 El Ombú, siguiendo hacia el S, aunque separada de la anterior por 23,5km, se cartografían las formaciones Arapey, Guichón, Mercedes, Asencio, Fray Bentos, Salto, Dolores y depósitos actuales.
- En la Hoja N-19 Paso del Palmar, ubicada a continuación de la anterior hacia el S, se cartografían las formaciones San Gregorio, Arapey, Mercedes, Asencio, Fray Bentos y depósitos actuales.
- En la Hoja O-19 Cololó ubicada al W de la anterior, y estando su extremo NO cercano a la zona del presente trabajo, se cartografían las formaciones Mercedes, Asencio, Fray Bentos y depósitos actuales.
- En la Hoja O-20 Bequeló, ubicada al S de la anterior, se cartografía un gneis definido como basamento de las formaciones sedimentarias mapeadas: Mercedes, Asencio, Fray Bentos y depósitos actuales.

5.2.2 Geología estructural

En las etapas de fotointerpretación fueron identificados indicios de lineamientos groseramente de dirección NO-SE, en el oeste de la zona de estudio.

Al no contar con evidencias de la presencia de actividad tectónica, más allá de los afloramientos de la Fm. Mercedes que ocurren en una franja NO-SE en la porción oeste de la zona de estudio, no fueron agregados lineamientos estructurales en el mapa generado.

5.2.3 Relevamiento geológico

Durante las salidas de campo se pudieron relevar los afloramientos que se indican a continuación (Tabla 4). Cabe señalar que la presencia de afloramientos en la zona de trabajo es muy escasa.

Tabla 4: Sitios de Relevamiento Geológico. Coordenadas UTM Z21.

Sitio	Geología	Edad	X UTM	Y UTM
EdF01	Depósitos Actuales	Actual	394491	6382756
EdF02	Fm. Mercedes	Cretácico Superior	396968	6379212
EdF03	Fm. Salto	Plioceno	404348	6377417
EdF04	Fm. Mercedes	Cretácico Superior	400443	6374646

- El sitio EdF01 se ubica en una zona costera del Estero de Farrapos. Corresponde a un depósito de arena que cubre la costa, con un ancho de 50 metros aproximadamente. Se describe en este punto arena fina a media, de color beige amarronado, con presencia muy escasa de grava gruesa dispersa de hasta 4 cm. No se reconocen estructuras sedimentarias debido a que el depósito no presenta diferencia topográfica con su entorno y no se exponen las estructuras horizontales que este tipo de depósito pudiera presentar.
- En el sitio EdF02 se define un afloramiento de 30 metros de largo por 10 metros de ancho y 2 metros de altura, notando la presencia de varios bloques de menor tamaño

caídos. El afloramiento presenta una expresión topográfica positiva respecto a su entorno. La zona circundante presenta una topografía plana, sobre todo hacia el OSO, hacia donde se observa una planicie muy bien marcada.

Se describe una metarenisca de grano fino a medio, cuarzosa silicificada, de color blancuzco-rosado, con estructuras sedimentarias muy bien preservadas. Es posible definir varios niveles los cuales se diferencian por las estructuras sedimentarias presentes: estratificación cruzada, niveles masivos (o con pobre preservación de estructuras) y un nivel muy poco definido con posible registro de estratificación cruzada tipo hummocky. Asimismo, se describe la presencia de un nivel conglomerádico hacia la base del afloramiento. El aspecto de los bloques aflorantes que se encuentran in situ es el presentado en la Figura 5-1. Por sus características se define como perteneciente a la Fm. Mercedes.



Figura 5-1: Afloramiento de metarenisca silicificada de la Fm. Mercedes. Sitio EdF02.

Se recabó la información de que este tipo de afloramientos aparecen varias veces desde este punto hacia el N (hacia San Javier), en dirección paralela a la línea de costa actual (Fabricio Mendieta, SNAP San Javier, com. pers.).

- El EdF03 es un afloramiento que se encuentra en el borde del arroyo Román Chico formando un barranco de 5 metros de altura aproximadamente. Se observan niveles intercalados de areniscas finas a medias, cuarzo feldespáticas, bien seleccionadas, de color anaranjado, poco consolidada, con estratificación cruzada con diferentes ángulos de buzamiento. Hacia el tope del afloramiento se observa un nivel conglomerádico, con clastos angulosos de hasta 2 centímetros de diámetro (tamaño grava gruesa). Como se observa en la Figura 5-2, el afloramiento está recubierto en la base del mismo por un precipitado de color marrón oscuro húmedo. Hacia el tope del afloramiento este precipitado desaparece y la roca se encuentra seca. Por las características litológicas se infiere que el afloramiento pertenece a la Fm. Salto.

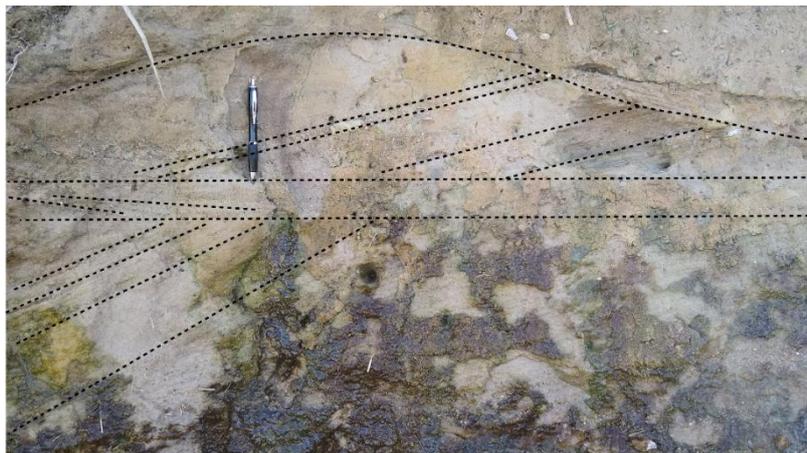


Figura 5-2: Afloramiento de arenisca de color rojizo, poco consolidada con estructuras sedimentarias, perteneciente a la Fm. Salto. Sitio EdF03.

- El EdF04 ocurre al igual que el punto EdF02, con una expresión topográfica marcada respecto a la superficie plana del terreno circundante. Se trata de una metarenisca de grano fino a medio, cuarzosa silicificada, de color blancuzco-rosado, con estructuras sedimentarias muy bien preservadas. Es posible definir niveles con estratificación cruzada de bajo ángulo. Por sus características se define como perteneciente a la Fm. Mercedes.

5.2.1 Mapa geológico de la zona de estudio

El mapa elaborado puede observarse en la Figura 5-3, donde se representan las siguientes unidades litológicas: Fm. Mercedes, Fm. Asencio, Fm. Fray Bentos, Fm. Salto, Fm. Bellaco, Fm. Libertad, Fm. Dolores y los Depósitos Actuales. Los depósitos actuales incluyen los depósitos aluviales y los depósitos que conforman el bañado. Se incluyen los afloramientos relevados.

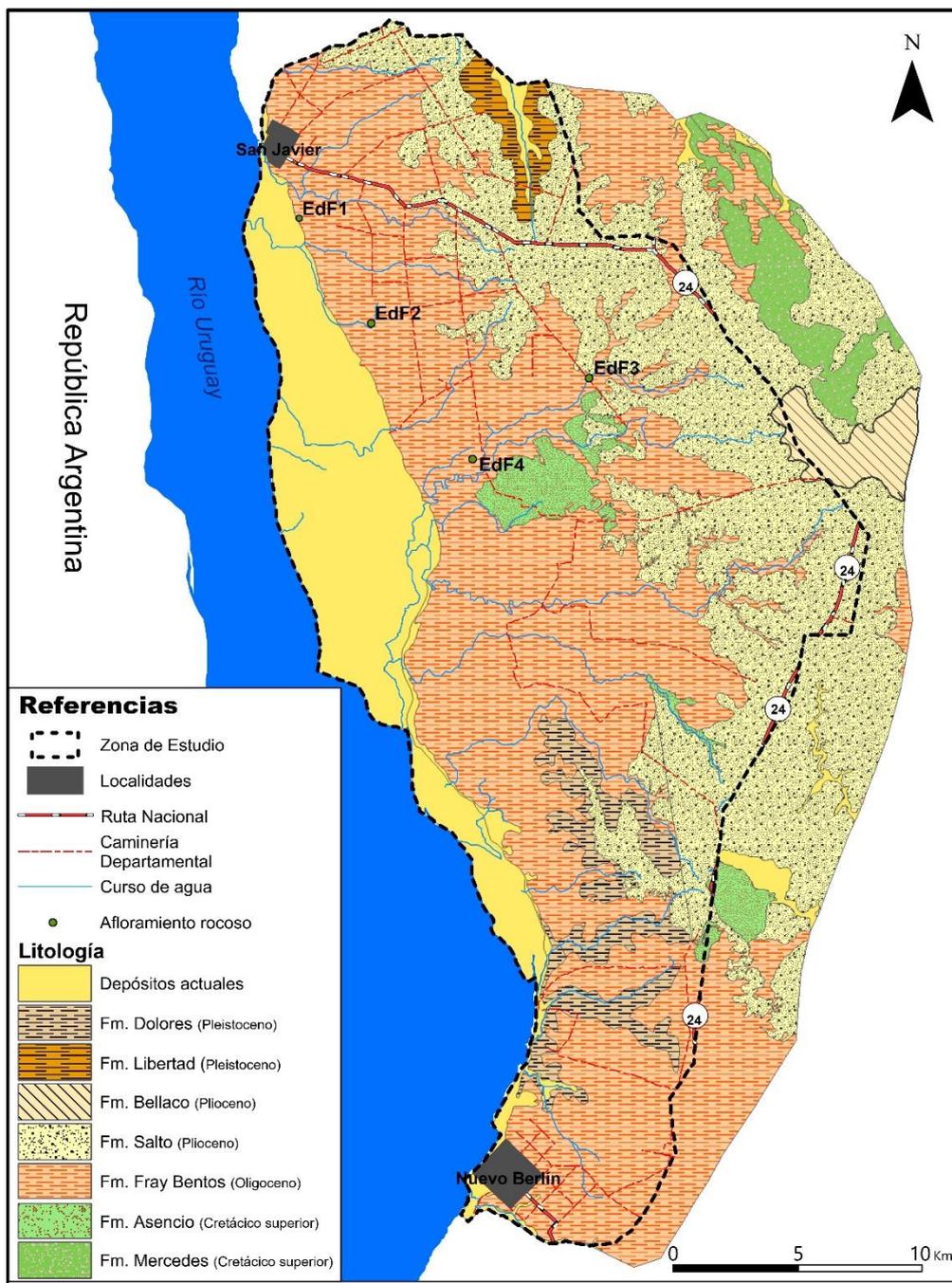


Figura 5-3: Mapa geológico de la zona de estudio. Escala 1:40.000.

5.2.2 Geología de subsuelo

Con la finalidad de realizar bocetos que muestren la evolución de la geología en subsuelo, se realizaron 3 cortes geológicos. En la Figura 5-4 se ubican los cortes con referencia al mapa geológico de superficie escala 1:40.000 realizado en el presente trabajo.

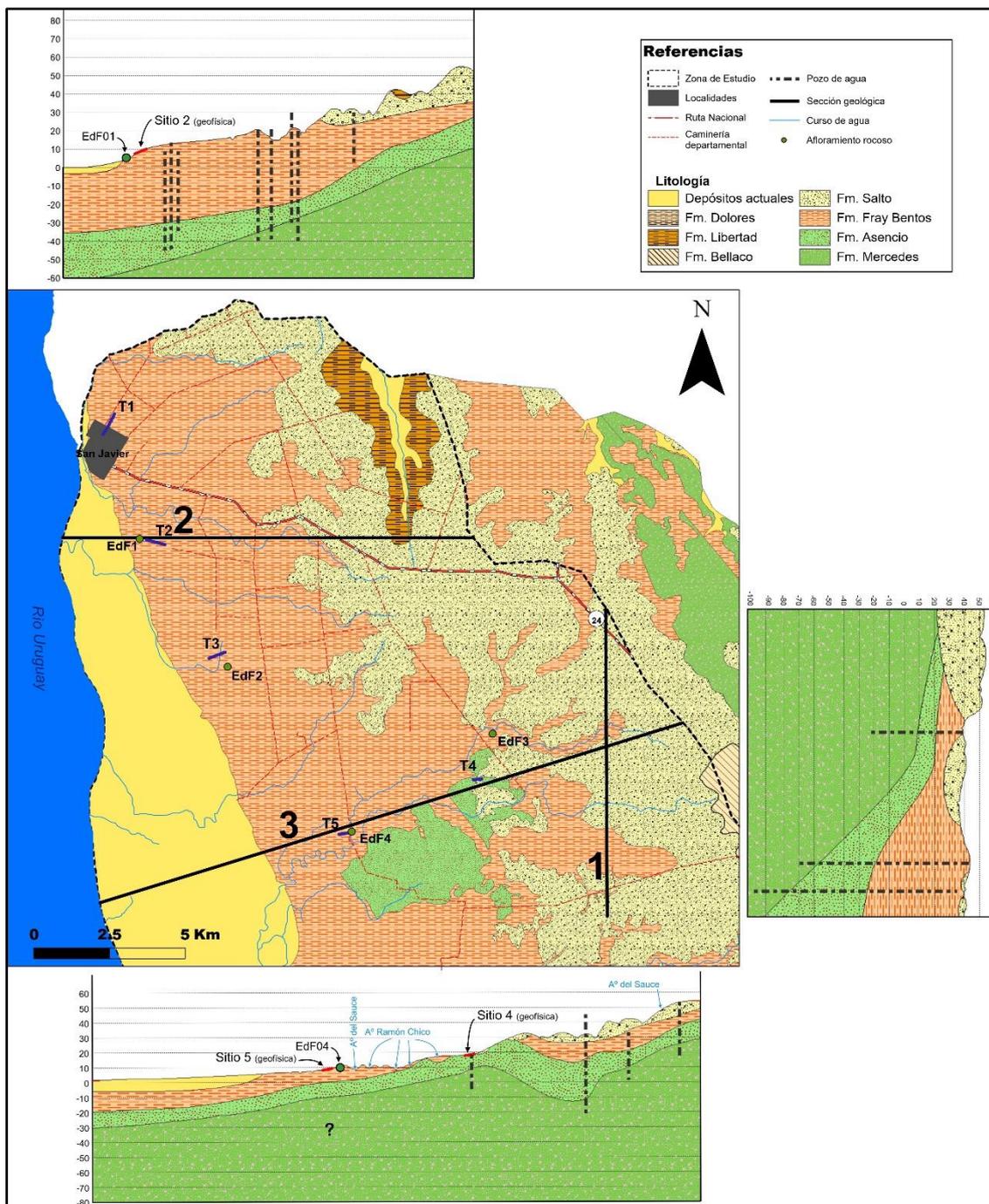


Figura 5-4: Sección del mapa geológico de detalle de la zona de estudio donde se sitúan los cortes geológicos.

Corte geológico 1:

Se esquematiza en esta sección geológica el desarrollo de la geología de subsuelo a partir de una línea de dirección NS (Figura 5-5). Con los datos disponibles, es posible delinear el desarrollo de la geología en subsuelo. La potencia de la Fm. Mercedes, presente por debajo de las otras formaciones determinadas en el corte, fue extrapolada del extremo E del Corte 2 (Figura 5-6).

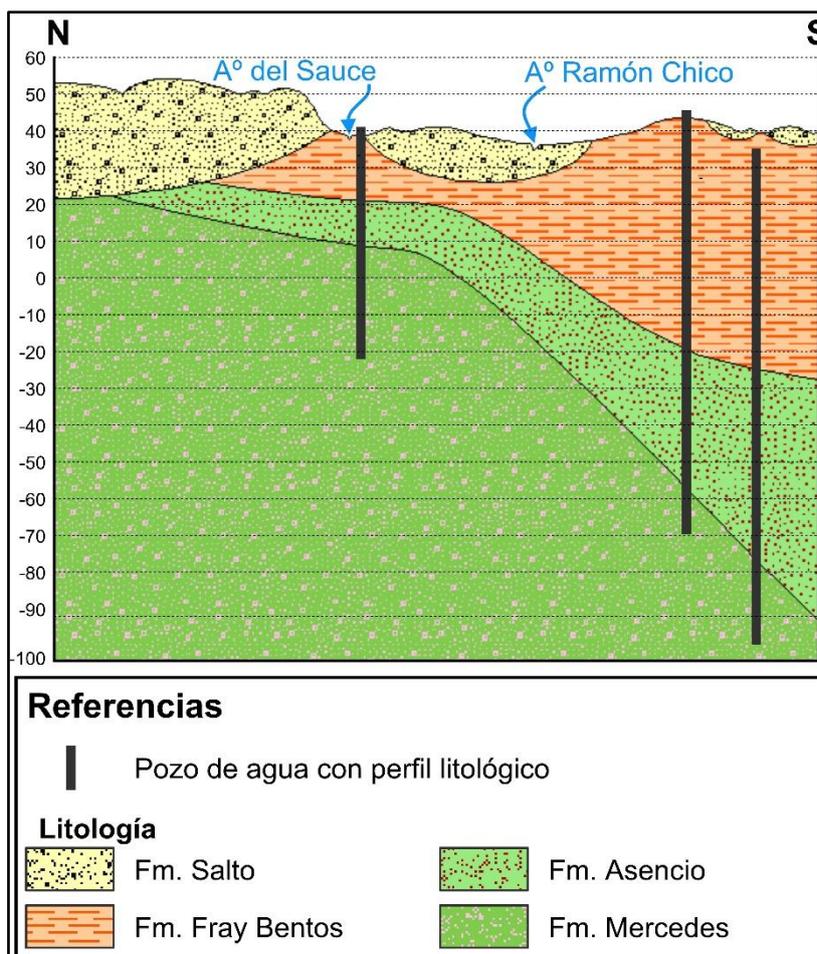


Figura 5-5: Corte geológico 1.

Corte geológico 2:

Se esquematiza en esta sección geológica el desarrollo de la geología de subsuelo a partir de una línea de dirección EO. En la Figura 5-6 puede observarse que se cuenta con información de perforaciones, relevamientos geofísicos y de un afloramiento. La tomografía aporta información del contacto de las formaciones Fray Bentos y Asencio.

Se indica que no es conocida la profundidad de los depósitos actuales que conforman el bañado. Esto se debe a la falta de datos de profundidad de este paquete sedimentario de edad reciente.

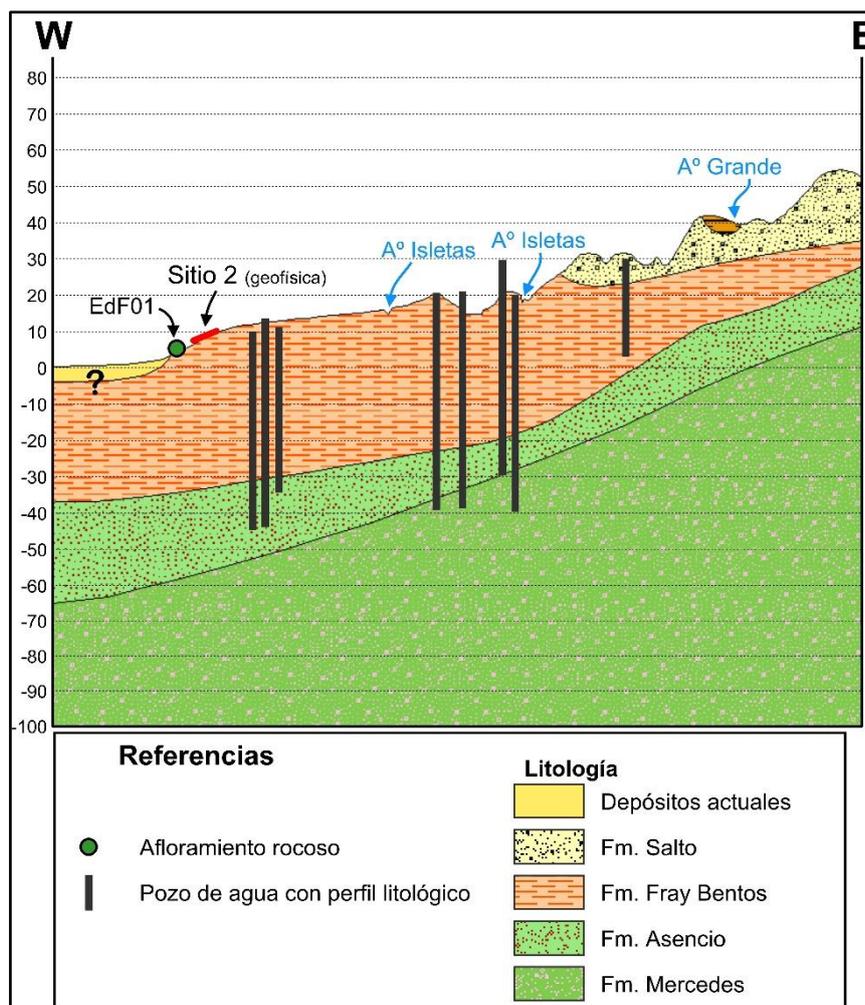


Figura 5-6: Corte geológico 2.

Corte geológico 3:

Se esquematiza en esta sección geológica el desarrollo de la geología de subsuelo a partir de una línea de dirección ENE-OSO. En la Figura 5-7 puede observarse que las litologías presentan basculamiento aparente al OSO.

Se indica que no es conocida la profundidad de los depósitos actuales que conforman el bañado. Esto se debe a la falta de datos de profundidad de este paquete sedimentario de edad reciente.

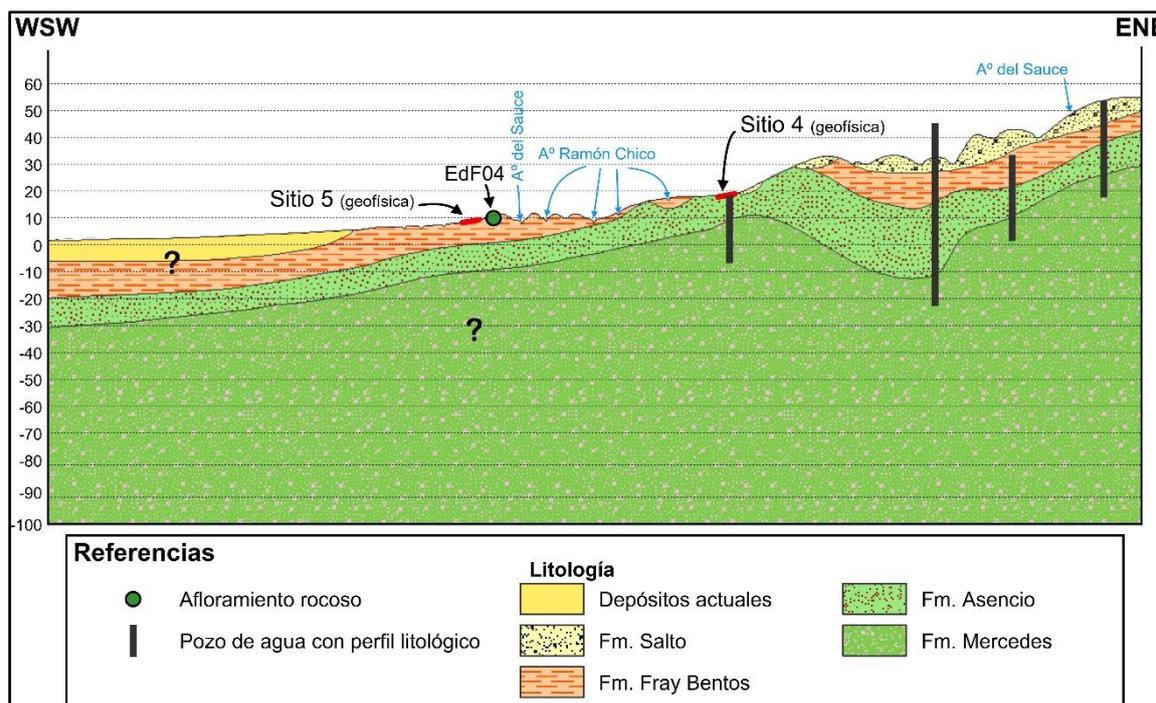


Figura 5-7: Corte geológico 3.

5.2.3 Columna estratigráfica

Del análisis e interpretación de la información de antecedentes, se definió la columna estratigráfica teórica que define el desarrollo vertical de unidades de roca presentes en el subsuelo de la zona de estudio (Figura 5-8).

Las diferentes formaciones se ordenan verticalmente según su edad, de más reciente a más antiguo. Se incluyen las litologías definidas en antecedentes con espesores ficticios, no existiendo representatividad, ni real ni relativa, en las potencias bosquejadas.

Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Litología	Descripción	Ambiente
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos actuales		Sedimentos limo-arcillosos, arenosos, a veces conglomerádicos (aluviones y coluviones)	Continental aluvial y palustre
		Pleistoceno	Fm. Libertad		Lodolitas, loess y fangolitas con porcentaje variable de arenas y arcillas, de color pardo a pardo rojizo.	Continental semiárido
			Fm. Bellaco		Pelita maciza, con yeso en cristales, rojiza y gris amarillento	Continental palustre
	Neogeno	Plioceno	Fm. Salto		Arena media, cuarzosa, bien seleccionada.	Continental fluvial
	Paleogeno	Oligoceno	Fm. Fray Bentos		Areniscas muy finas y loess, con porcentaje variable de arena fina, a veces muy arcillosas, masivas, de color anaranjado.	Continental semiárido
	Mesozoico	Cretácico Superior	Fm. Asencio		Areniscas finas, bien seleccionadas, arcillosas, masivas, de colores blanco y rosado. Presenta procesos secundarios de ferrificación y silicificación, de color rojo herrumbre, con intercalaciones de calizas.	Continental árido
Fm. Mercedes				Areniscas medias a conglomerádicas, mal seleccionadas, arcillosas, con estratos silicificados, de estratificación cruzada, de colores blanco y rosado. Presenta intercalaciones de conglomerados, lutitas y calizas.	Continental semiárido	
Fm. Guichón				Areniscas finas a medias, bien seleccionadas, Estratificación cruzada y/o paralela, de color rojizo. Excepcionalmente niveles conglomerádicos.	Continental árido	

Figura 5-8. Columna estratigráfica definida en la zona de estudio.

Es importante recalcar que la columna estratigráfica presentada no fue producto de estudios de campo ni gabinete referentes al estudio de las rocas aflorantes y subyacentes ni a sus relaciones de contacto. En el presente trabajo no se realizó análisis de facies, definición de contactos, ni tampoco estudios estructurales.

5.3 Geofísica

Todas las mediciones realizadas en cada sitio muestran una alta coherencia entre sí para las diferentes metodologías y presentan un bajo de error de ajuste.

La totalidad de los resultados de ERT para los diferentes arreglos electródicos, así como los resultados del método TDEM se presentan en el Anexo 10.2.2.

En el sitio 1, el perfil litológico de la perforación de OSE existente en la zona, indica que en los primeros 18 m de profundidad se encuentra la Fm. Salto, de 18 a 42 m la Fm. Fray Bentos y de 42 a 153 m la Fm. Mercedes. Si se realiza un corte en la progresiva 300 m del perfil de ERT, a la Fm. Salto se le podría asociar resistividades en el orden de 10-20 ohm.m aunque este perfil no es homogéneo a lo largo de toda su extensión. La Fm. Fray Bentos se puede asociar a una resistividad menor a 12 ohm.m. A partir de la cota -40 m aproximadamente (45 metros de profundidad), la resistividad aumenta considerablemente, alcanzando valores del orden de 40 ohm.m. Esta zona de mayor resistividad coincide con la Fm. Mercedes.

En el sitio 2, el perfil resistivo presenta cierta similitud con el perfil obtenido en el sitio 1. En los primeros 40 metros de profundidad con valores de resistividad menores a 20 ohm.m y la zona de mayor resistividad alcanza valores de 30 ohm.m como máximo para el arreglo Wenner Alpha que es el que presenta menor error de ajuste. Los arreglos Gamma y Schlumberger presentan resistividades mayores a 30 ohm.m en esta zona.

El perfil obtenido a través del TDEM también muestra un paquete resistivo de 38 m de espesor con valores en el orden de 10 ohm.m. Entre los 38 m y 154 m la resistividad aumenta a 24 ohm.m aproximadamente. Por debajo de este paquete resistivo, la resistividad disminuye a 9 ohm.m hasta los 360 m aproximadamente.

El sitio 3 muestra un perfil resistivo diferente a los sitios previamente mencionados. Se aprecian resistividades altas (orden de 40 ohm.m aproximadamente) en los primeros 30 m de profundidad hasta la progresiva 160 m. Hacia la zona de esteros, la resistividad disminuye por debajo de 20 ohm.m para todo el perfil. El arreglo Wenner Gamma muestra una zona resistiva en la progresiva de 240 m y profundidad de 50 m aunque este arreglo presenta un error de ajuste del 10% y no se consideran resultados confiables. El TDEM realizado en este sitio se ubicó hacia el oeste del final de la transecta de ERT. El perfil obtenido muestra resistividades menores a 20 ohm.m hasta los 10 m de profundidad. Entre los 100 m y 200 m la resistividad aumenta a 23 ohm.m para luego descender nuevamente a 7 ohm.m hasta los 300 m aproximadamente. El perfil obtenido para el TDEM es consistente con lo obtenido por el perfil de ERT para el final de la transecta.

El sitio 4 es el perfil que presenta mayor homogeneidad resistiva de los sitios relevados. Todos los arreglos presentan resistividades del orden de 20 ohm.m para todo el perfil estudiado.

El sitio 5 muestra un perfil homogéneo para toda la transecta, donde existe un medio resistivo entre 20 ohm.m y 30 ohm.m a partir de 5 m de profundidad con una potencia de 10 - 15 m aproximadamente. Para profundidades mayores la resistividad no supera los 15 ohm.m para todo el perfil.

El perfil obtenido mediante TDEM para este sitio muestra coincidencia con lo obtenido mediante ERT. Una capa resistiva de 7 m de 10 ohm.m aproximadamente. Si

bien el aumento de resistividad también se observa en el perfil obtenido con el TDEM, la potencia obtenida es del orden de 40 m, siendo mayor respecto a lo obtenido con ERT. A partir de los 48 m la resistividad disminuye a 6 ohm.m hasta los 80 m aproximadamente, siendo consistente con lo observado por la ERT. El aumento de resistividad observado con el TDEM a partir de los 80 m no se puede observar con la ERT debido a la menor profundidad de investigación alcanzada.

El sitio 6 presenta una profundidad de investigación de aproximadamente 60 m, donde los primeros 40 m se caracterizan por presentar resistividades en el orden de 10-15 ohm.m para toda la transecta relevada. A partir de la cota -20 m (30 metros de profundidad) la resistividad aumenta por encima de los 40 ohm.m para todo el perfil.

El TDEM realizado en el sitio es consistente con lo obtenido mediante ERT. Los primeros 20 m con resistividades menores a 10 ohm.m. Entre los 20 y 80 m de profundidad, la resistividad aumenta por encima de los 150 ohm.m. El valor de resistividad obtenido para este medio es mayor a lo obtenido con ERT. Entre los 80 m y 200 m la resistividad es de 10 ohm.m.

5.4 Interpretación Geológica a partir de los relevamientos geofísicos

En este capítulo se incluyen los perfiles de ERT de los sitios relevados junto a la interpretación geológica realizada.

Sitio 1

Visualizando el resultado de la ERT realizada en el Sitio 1, es posible observar que las resistividades marcan una aceptable correlación con las litologías definidas de una perforación cercana que coincide con la progresiva 300 m de la ERT. Se esquematiza lo antes descrito en la Figura 5-9. Debido a la profundidad de investigación alcanzada, no se logra alcanzar la Fm. Guichón, subyacente a la Fm. Mercedes.

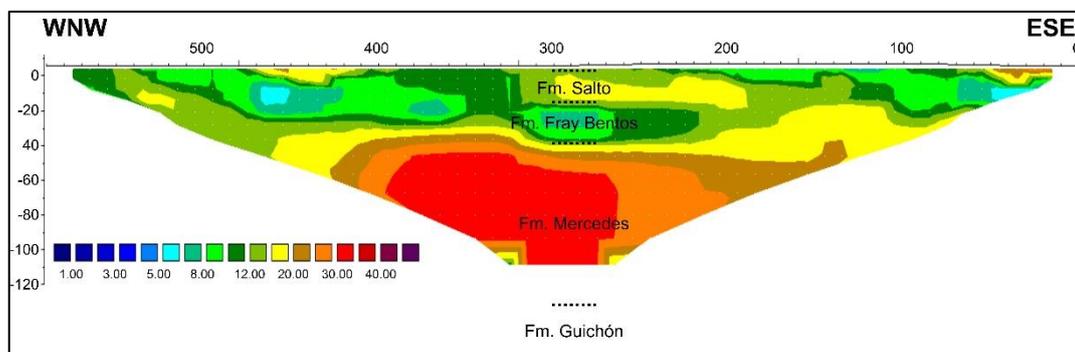


Figura 5-9: Corte geólogo-geofísico en la ERT realizada en el Sitio 1.

Según lo observado en la Figura 5-9, la Fm. Salto presenta valores de resistividad aproximadamente de 20 ohm.m, la Fm. Fray Bentos entre 8-15 ohm.m y la Fm. Mercedes valores entre 20 ohm.m y 35 ohm.m.

Sitio 2

En este sitio se adjunta la descripción litológica de una perforación ubicada a casi un kilómetro de distancia del Sitio 2, interpretando que existe una continuidad lateral del perfil descrito en la perforación y los registros marcados por el análisis geofísico (Figura 5-10).

También se ubica el afloramiento EdF01 en el extremo izquierdo (O) de la tomografía, donde se describen materiales sedimentarios costeros actuales, afines con una resistividad relativa media a baja, tomando en cuenta que son materiales arenosos húmedos, pero no saturados en agua en esa porción de la tomografía. La geología de superficie que se encuentra mapeada en este sitio pertenece a la Fm. Fray Bentos (Figura 5-3) en la línea de esta tomografía.

El Sitio 2 de análisis geofísico se encuentra en el trazado del corte geológico 2 (Figura 5-6).

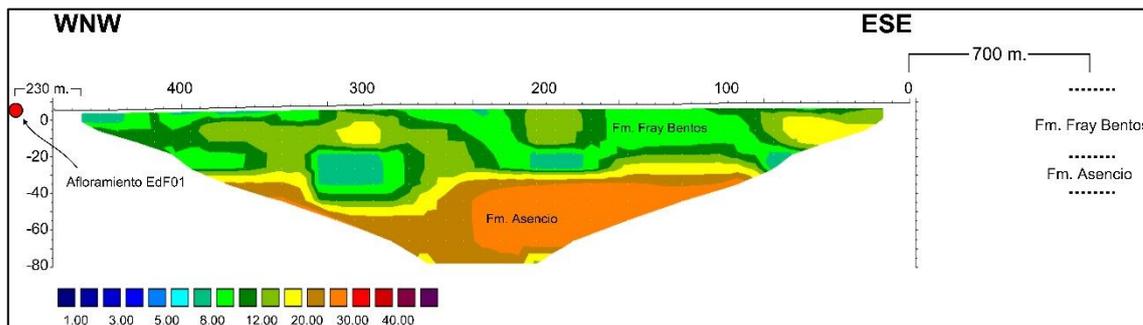


Figura 5-10: Corte geólogo-geofísico en la ERT realizada en el Sitio 2.

Sitio 3

Cercano a la zona donde se realizó la tomografía se identifica un afloramiento de la Fm. Mercedes (EdF02: metarenisca y metaconglomerado silicificados). En el mapa de geología de superficie, por razones de escala, en este sitio solo se muestra la Fm. Fray Bentos. De todas formas, es interesante hallar afloramientos de esta litología en esta zona del mapa, habiendo establecido el comportamiento estructural de esta formación con buzamiento al SO.

En la tomografía ubicada en el Sitio 3 se observa que los valores de mayor resistividad se encuentran en la porción más superficial de la tomografía, a diferencia de lo que se observa, a grandes rasgos, en las tomografías de los otros sitios.

Según lo observado en el sitio 1 a la Fm. Mercedes es posible asociarle valores de resistividad en el rango de 20 a 35 ohm.m. Por lo tanto se podría asumir que los colores rojizos en la parte noreste de la tomografía se pueden asociar a la Fm. Mercedes que aflora en EdF02.

En la Figura 5-11 también se agrega la descripción litológica de un pozo cercano, la cual muestra la Fm. Mercedes a 52 m de profundidad. Esto puede mostrar la existencia de tectónica en la zona debido a que la Fm. Mercedes en general tiene una aptitud estructural con buzamiento al suroeste.

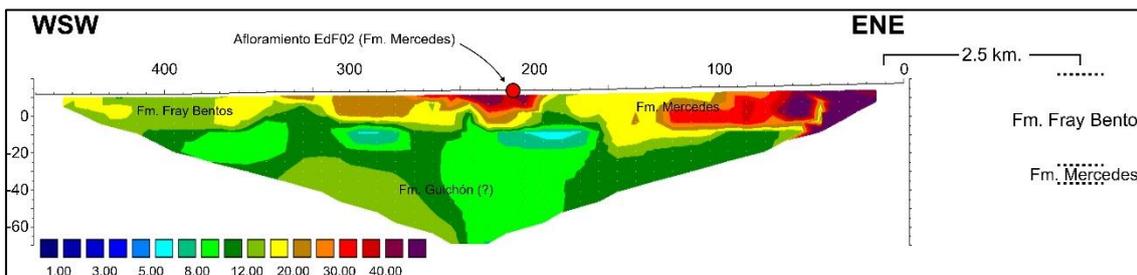


Figura 5-11: Corte geólogo-geofísico en ERT realizada en el Sitio 3.

Sitio 4

En el mapa geológico de superficie (Figura 4-4) puede observarse que en este punto, se mapea la Fm. Asencio al este de la tomografía y la Fm. Fray Bentos al oeste. Según lo obtenido en la tomografía (Figura 5-12) se podría asociar los valores de resistividad de 12 ohm.m a la Fm. Fray Bentos según lo establecido en el sitio 1 y el mapa geológico de superficie. Según el mapa de geología de superficie, se podría asociar a la Fm. Asencio, valores de resistividad de 20 ohm.m aproximadamente. En función de la litología que presenta esta formación, parece lógico asociarle esta resistividad, aunque puede ser muy variable. Es importante destacar que no existe parametrización para esta formación.

El Sitio 4 de análisis geofísico se encuentra en el trazado del corte geológico 3 (Figura 5-7).

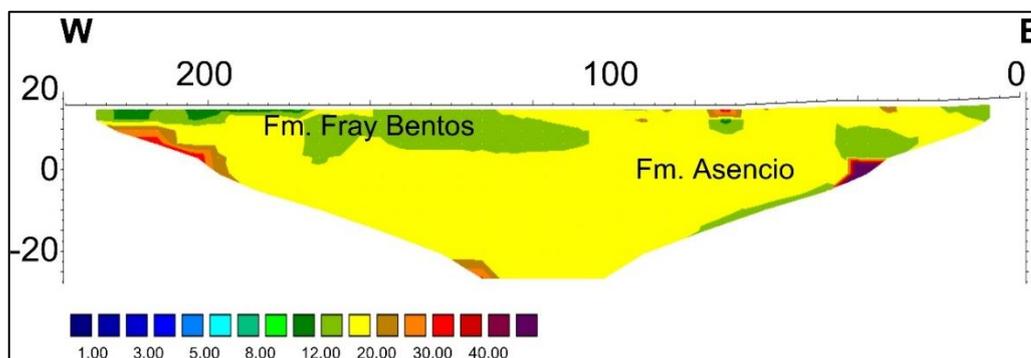


Figura 5-12: Corte geológico-geofísico en la ERT realizada en el Sitio 4.

Sitio 5

En el mapa de geología de superficie (Figura 5-3) donde se realizó la ERT se cartografió la Fm. Fray Bentos. A 90 m al este de la ERT se encuentra el afloramiento EdF04, en el cual se describieron metareniscas y metaconglomerados silicificados, pertenecientes a la Fm. Mercedes. Del mismo modo que en el sitio 3, no es posible mostrar a la Fm. Mercedes en esta parte del mapa por razones de escala.

En cuanto a la interpretación geológica de la ERT es posible inferir que las resistividades mayores e igual a 20 ohm.m corresponden a la Fm. Mercedes y las resistividades menores a 15 ohm.m que subyacen la capa más resistiva podrían asociarse a la Fm. Guichón en función de la estratigrafía regional. En la zona superior de la ERT, donde se encuentran resistividades entre 8 ohm.m a 12 ohm.m, se podría asociar a la Fm. Fray Bentos, mapeada en la zona.

El Sitio 5 de análisis geofísico se encuentra en el trazado del corte geológico 3 (Figura 5-7).

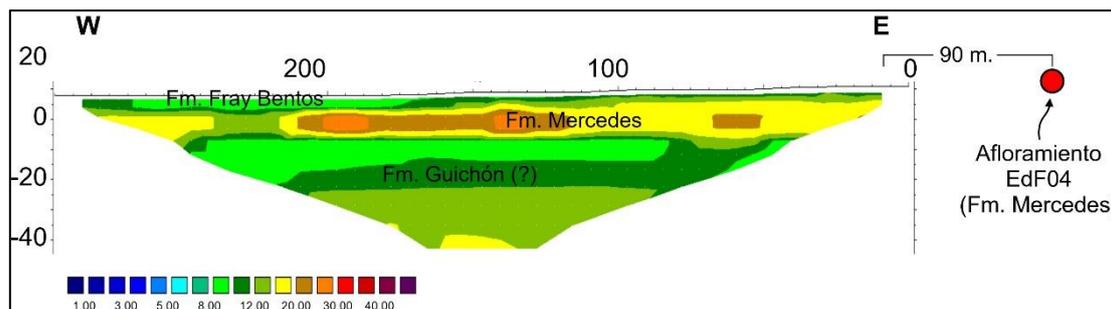


Figura 5-13: Corte geológico-geofísico en la ERT realizada en el Sitio 5.

Sitio 6

En la tomografía realizada en el sitio 6 (Figura 5-14) se describe la presencia de un nivel con menor resistividad hacia la parte más superficial (menor a 12 ohm.m) y una resistividad mayor hacia la parte inferior (20 a 50 ohm.m) con una grosera definición de estratos subhorizontales. Esto podría interpretarse como un nivel de la Fm. Fray Bentos apoyada sobre un material más resistivo, que en las tomografías de los sitios 1 y 3 se asoció con la Fm. Mercedes.

Se agrega la posición de un pozo surgente que se encuentra a 280 metros del fin de la tomografía hacia el O. No fue posible obtener información del perfil constructivo de la perforación. Mediante el relevamiento en campo, se midió una profundidad de la perforación de 32 m.

Los resultados de la ERT sumado a la información del pozo surgente, indicaría que en la zona la Fm. Fray Bentos se encuentra confinando a la Fm. Mercedes. Esto es coherente con los bajos valores de resistividad obtenidos para la Fm. Fray Bentos, asociados a alto contenido de materiales finos como limos y arcillas.

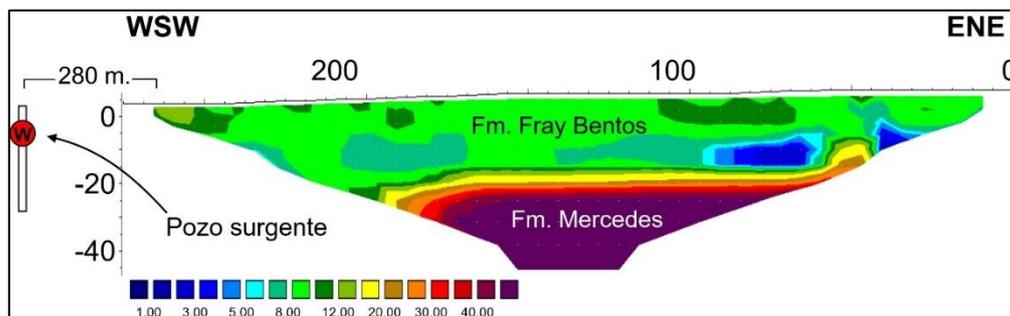


Figura 5-14: Corte geológico-geofísico en la ERT realizada en el Sitio 6.

En la Tabla 5 y la Tabla 6 se resumen los rangos de resistividad obtenidos para cada formación identificada en cada sitio mediante ERT y TDEM.

Tabla 5: Rangos de resistividad obtenida mediante ERT para cada formación en cada sitio.

Resistividad en ohm.m para ERT				
Sitio/Fm.	Fray Bentos	Asencio	Mercedes	Guichón
1	8-15		20-35	
2	8-15	20-30		
3	15-20		20-+40	8-15
4	12-14	20		
5	8-12		20-25	9-15
6	8-12		+40	

Tabla 6: Rangos de resistividad obtenida mediante TDEM para cada formación en cada sitio.

Resistividad en ohm.m para TDEM				
Sitio/Fm.	Fray Bentos	Asencio	Mercedes	Guichón
2	10	24		
3	8			15
5	10		19	6.2
6	2-8.8		154	

5.5 Piezometría

En la Figura 5-15 se muestran los histogramas obtenidos para los 69 datos piezométricos relevados. En la izquierda se muestra el histograma de los datos originales y a la derecha se muestra el histograma de los residuales con distribución de probabilidad similar a la normal.

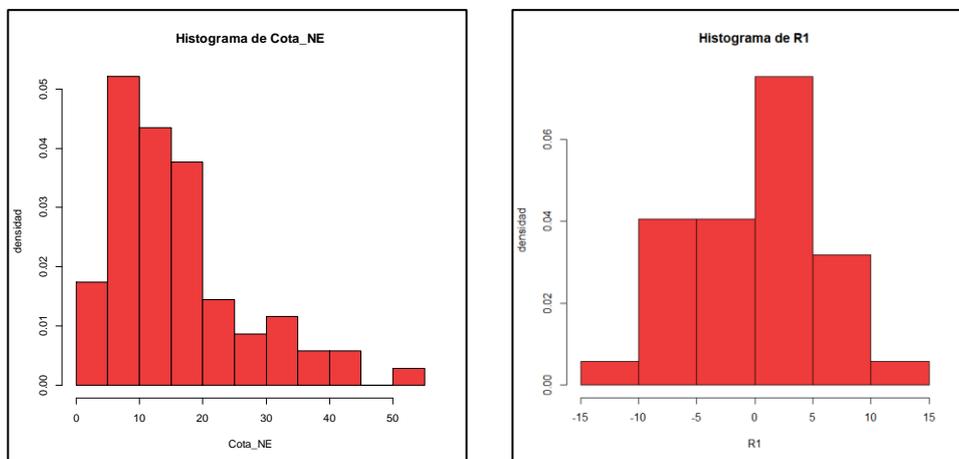


Figura 5-15: Histograma de datos de nivel piezométrico estático originales (izquierda) e histograma de los residuales de nivel estático eliminando la tendencia (derecha).

Trabajando con los datos residuales se ajustó un modelo esférico de semivariograma teórico al semivariograma experimental (Figura 5-16). La Tabla 7 presenta los parámetros del semivariograma teórico ajustado.

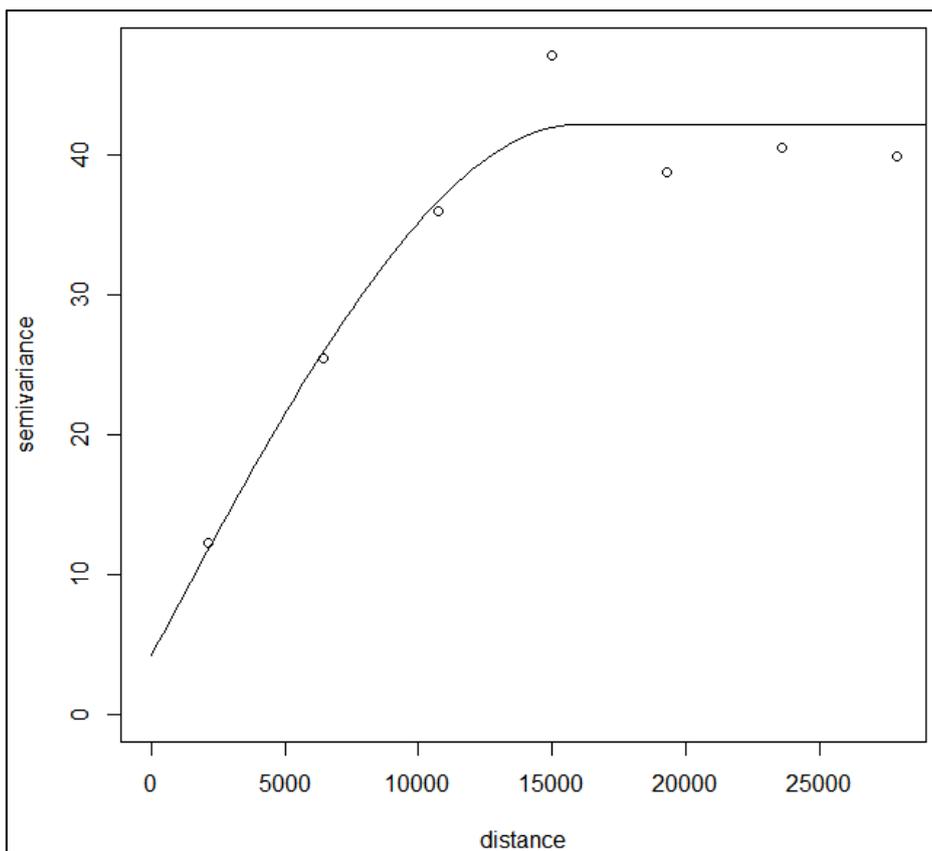


Figura 5-16: Semivariograma real y ajuste teórico mediante semivariograma esférico.

Tabla 7: Parámetros del semivariograma teórico ajustado a los datos de nivel piezométrico.

Umbral (m²)	37.9
Nugget (m²)	4.2
Rango (m)	15973

En base a la información relevada en campo y al análisis geoestadístico realizado se obtuvo un mapa piezométrico de isolíneas cada 5 m (Figura 5-17).

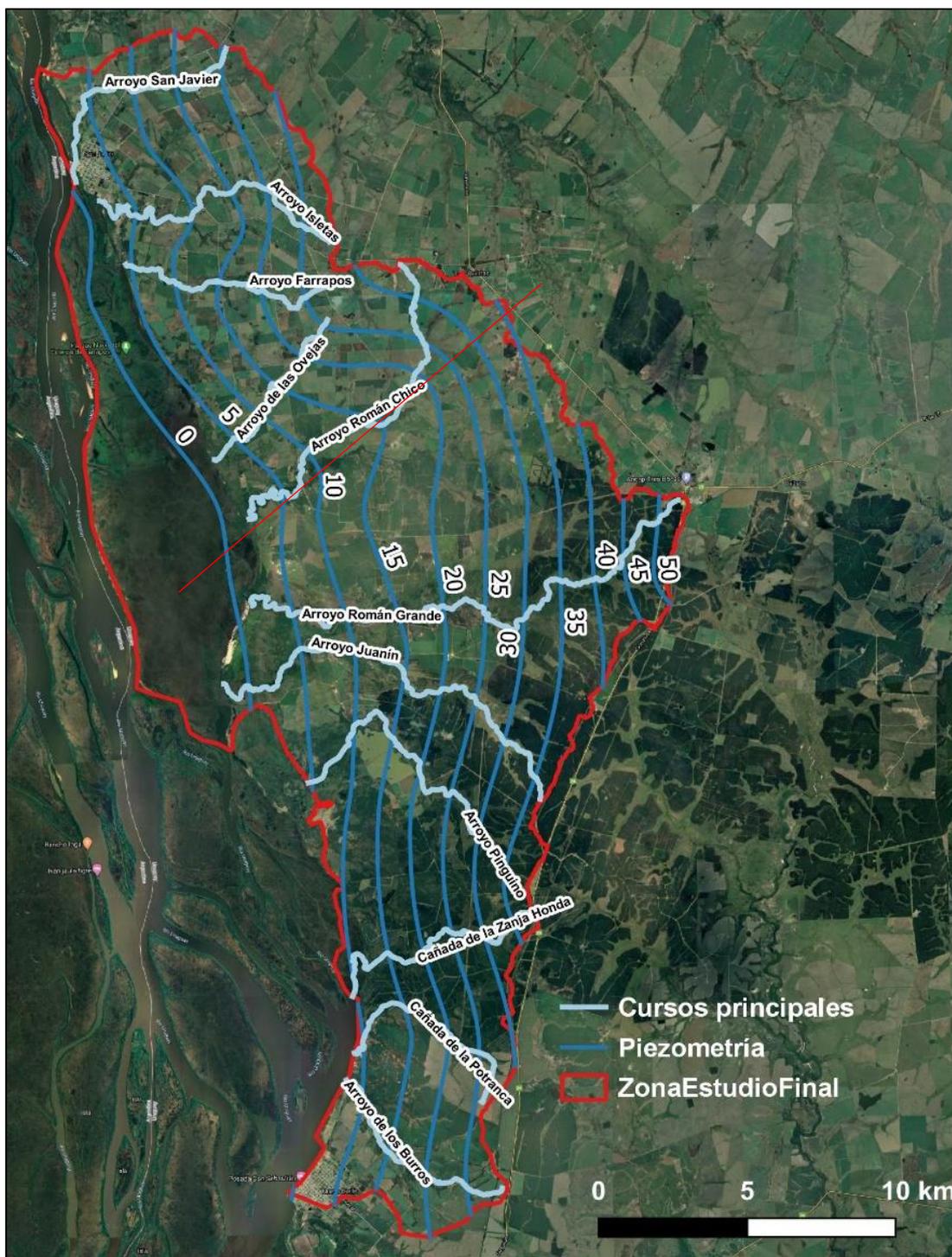


Figura 5-17: Piezometría – febrero 2018.

Como resultado de este estudio se definió la existencia de un flujo con dirección E-O en toda la zona de estudio, con valores piezométricos que van desde los 50 msnm al E hasta 0 msnm en las cercanías del Río Uruguay (O). Se observa la interacción con los cursos de agua superficial menores, los cuales funcionarían, al igual que el Río Uruguay, de zonas de descarga del acuífero. Sumado a lo anterior, se observa en el mapa piezométrico la existencia de dos divisorias de agua, generando 3 subcuencas subterráneas. Una de las divisorias se ubica entre las nacientes del Arroyo Farrapos y el

Arroyo de las Ovejas, mientras que la otra se identifica entre el Arroyo Román Grande y el Román Chico.

En cuanto a la recarga, la misma se daría en toda el área de estudio debido a las características litológicas de la Fm. Salto y Fm. Fray Bentos, con mayor extensión en superficie. El agua de lluvia local infiltraría a través de estas formaciones, generando flujos de descarga local así como infiltración profunda.

5.6 Hidroquímica

En la Tabla 8 se presentan las características de muestreo y parámetros medidos in situ en cada punto.

Tabla 8: Características de muestreo y parámetros medidos en campo.

Muestra	Tipo	Fecha	Hora	pH	T (°C)	CE (us/cm)
P4	Pozo	15/04/2019	11:50	7	19.7	865
P5	Pozo	15/04/2019	13:30	6.7	19.3	790
P7	Pozo	15/04/2019	16:10	5.6	20	106
P8	Pozo	15/04/2019	17:00	7.3	19.7	495
P9	Pozo	15/04/2019	18:00	7.1	19.5	600
P10	Pozo	15/04/2019	18:35	6.6	19.6	535
P11	Pozo	17/04/2019	10:00	7.2	19.5	560
S1	Superficial	15/04/2019	11:20	7.6	17.7	604
S3	Superficial	16/04/2019	17:35	7.1	17.7	595
S4	Superficial	17/04/2019	13:30	7.2	16.9	585
S5	Superficial	17/04/2019	15:30	7	22.3	72
LG1	Laguna	16/04/2019	12:00	8.2	17.3	80
LC1	Laguna	16/04/2019	13:30	7.5	20.2	77
I1	Subsuperficial	16/04/2019	13:00	6.3	22	318

Los resultados de los análisis hidroquímicos e isotópicos completos para cada punto de muestreo pueden consultarse en el Anexo 10.3.

5.6.1 Calidad de los análisis

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio, se realizó el balance iónico de cada muestra con el fin de determinar la calidad de los mismos. Estos resultados se expresan en la Tabla 9.

Tabla 9: Balance iónico de las muestras analizadas.

Punto	HCO ₃ ⁻ (meq/L)	NO ₃ ⁻ (meq/L)	Cl ⁻ (meq/L)	SO ₄ ²⁻ (meq/L)	Na ⁺ (meq/L)	K ⁺ (meq/L)	Mg ²⁺ (meq/L)	Ca ²⁺ (meq/L)	suma anión	suma catión	%error
P4	6.376	0.02	0.82	2.29	5.000	0.13	0.83	3.31	9.51	9.27	-1%
P5	7.98	0.36	0.26	0.19	0.743	0.44	3.00	4.87	8.78	9.05	1.5%
P7	0.762	0.27	0.10	0.11	0.157	0.25	0.14	0.43	1.24	0.97	-12.2%
P8	5.092	0.00	0.12	0.42	3.096	0.07	0.34	2.06	5.63	5.56	-1%
P9	3.779	0.23	0.25	1.79	2.809	0.10	0.60	2.94	6.04	6.45	3%

P10	5.414	0.21	0.17	0.16	1.122	0.15	0.95	3.68	5.95	5.89	-0.6%
P11	6.056	0.08	0.15	0.36	3.652	0.09	0.44	2.15	6.64	6.33	-2.4%
S1	6.416	0.05	0.13	0.37	2.157	0.13	0.94	3.71	6.96	6.93	0%
S3	6.736	0.13	0.17	0.23	1.639	0.15	0.95	4.04	7.27	6.77	-3.5%
S4	7.62	0.12	0.18	0.24	3.122	0.13	0.72	2.77	8.16	6.74	-9.5%
S5	0.922	0.00	0.09	0.00	0.176	0.14	0.15	0.29	1.02	0.76	-14%
I1	6.536	0.00	0.42	0.17	1.052	0.01	2.85	3.30	7.13	7.21	0.6%
LG1	1.324	0.00	0.01	0.00	0.143	0.02	0.22	0.50	1.34	0.88	-20.5%
LC1	1.604	0.00	0.02	0.00	0.105	0.02	0.22	0.47	1.62	0.81	-33%

El balance iónico en diez de los catorce puntos muestreados fue aceptable, obteniéndose errores menores al 10% para todos los casos. Las aguas con menores valores de conductividad eléctrica (P7, S5, LG1 y LC1) correspondientes a un pozo, un curso de agua y a las dos lagunas, reportaron valores altos en el porcentaje de error del balance iónico. Las conductividades en estas aguas son todas menores a 110 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

5.6.2 Clasificación hidroquímica y tipos de agua

En la Figura 5-18 y Figura 5-19 se muestran los diagramas de Piper obtenidos. En general, las aguas de la cuenca son bicarbonatadas cálcicas a sódicas. Si se hace un análisis más exhaustivo, las aguas de los pozos P4, P8 y P11 son del tipo bicarbonatadas sódicas. El agua subsuperficial tomada en la zona de los humedales (I1) es del tipo bicarbonatada cálcica – magnésica. Las aguas de los pozos P7, P9 y de los cursos de agua S4 y S5 son del tipo bicarbonatadas cálcicas – sódicas. El resto de las aguas: pozos P5 y P10, cursos de agua S1 y S3 y lagunas LC y LG son bicarbonatadas cálcicas.

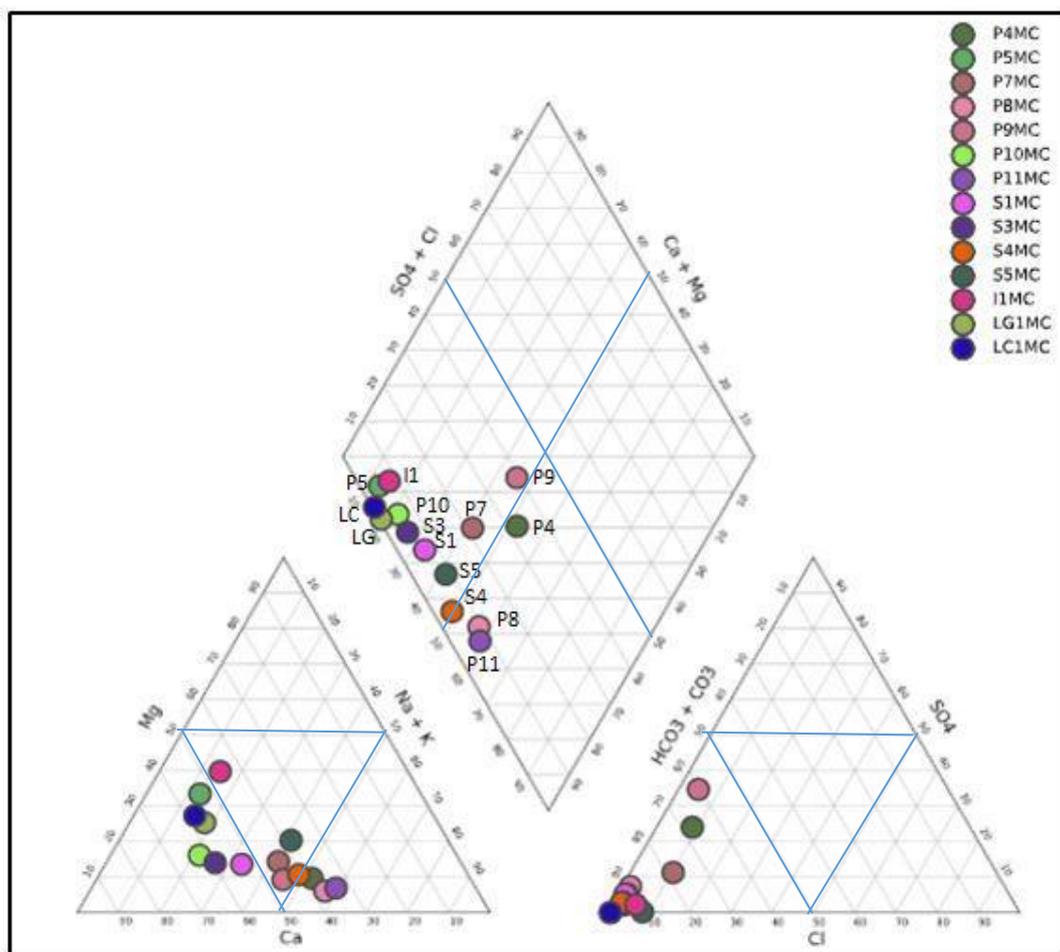


Figura 5-18: Diagrama de Piper de todas las muestras analizadas.

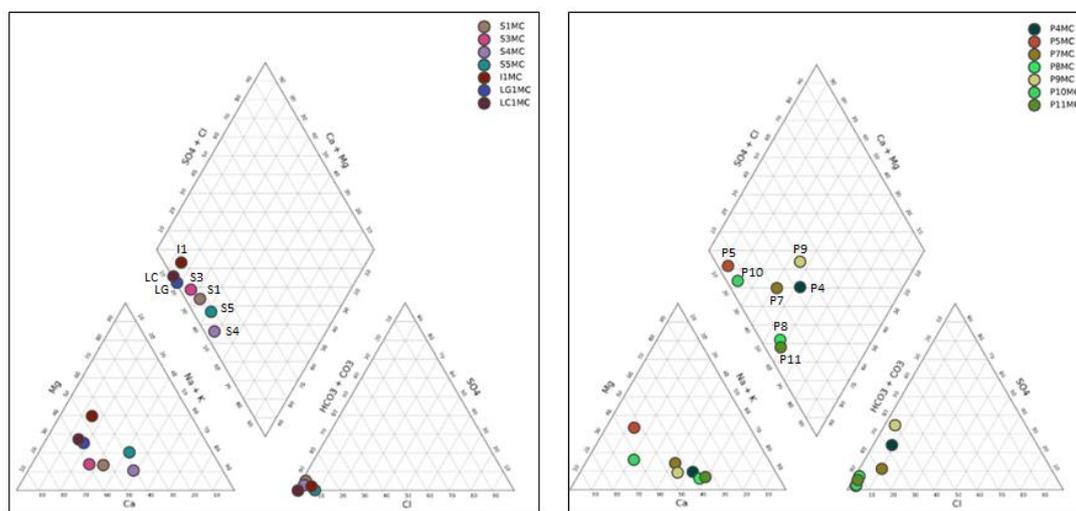


Figura 5-19: Diagramas de Piper de las muestras de agua superficial (izquierda) y muestras de agua subterránea (derecha).

La Figura 5-20 presenta los catorce análisis de agua considerados mediante un diagrama de Schöeller-Berkaloff. En las aguas subterráneas se observa un fuerte exceso de Na sobre Cl. Los procesos que podrían estar generando este comportamiento hidroquímico son la alteración de ciertos silicatos como la disolución de plagioclasas sódicas y la ocurrencia de procesos de intercambio catiónico con liberación de Na y

fijación de Ca en las arcillas presentes en el paquete sedimentario que compone la cuenca de estudio.

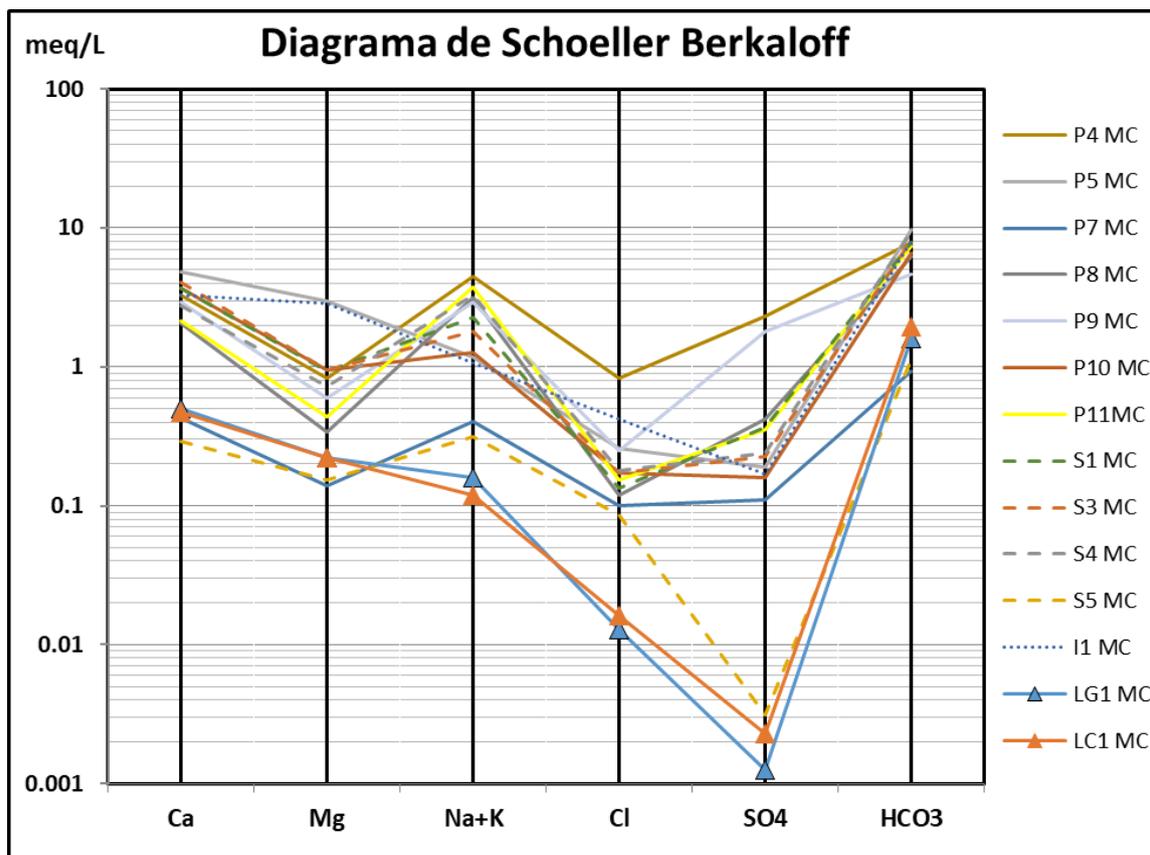


Figura 5-20: Diagramas de Schöeller Berkloff para las 14 muestras analizadas.

Existe una clara diferencia entre la composición iónica de las aguas subterráneas y de los cursos superficiales S1, S3 y S4, con las aguas de las lagunas y del curso S5. Como es de esperar, las concentraciones iónicas de las lagunas son consistentes entre sí. Estas presentan concentraciones iónicas más bajas, sobre todo en los iones Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} si se las compara con las aguas subterráneas y con los cursos menores de la cuenca.

Si se analizan por separado las aguas subterráneas, se observan algunas diferencias entre concentraciones iónicas de las mismas, que parecen responder a su ubicación geográfica en la cuenca de estudio (Figura 5-21). Se observa la existencia de dos divisorias de agua bien marcadas por la piezometría, que dividen la cuenca en 3 subcuencas. Si se construyen las posibles líneas de flujo del acuífero, la hidroquímica pareciera mostrar una diferencia en las concentraciones iónicas de las aguas que pertenecen a las diferentes subcuencas. No obstante, el número de muestras analizadas en este trabajo es escaso para ser concluyentes.

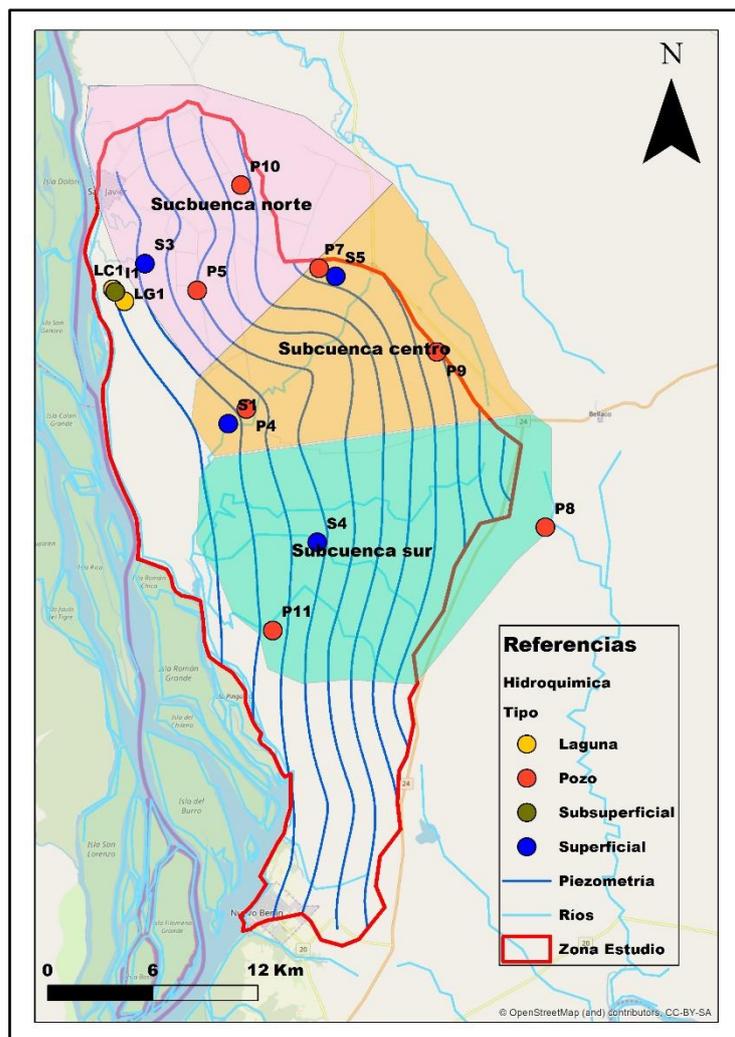


Figura 5-21: Subcuencas subterráneas identificadas.

La hidroquímica pareciera mostrar la incidencia de una formación geológica yesífera (Fm. Bellaco). La Figura 5-22 presenta los diagramas de Schöeller-Berkaloff para las aguas subterráneas. Según la piezometría y la ubicación de los pozos muestreados, se podrían distinguir las siguientes líneas de flujo: P9-P4 (subcuenca centro) y P8-P11 (subcuenca sur) (ver Figura 5-21). Las aguas de los pozos P10 y P5 se ubican en la subcuenca norte. Según el mapa de geología de superficie (Figura 5-3), en la zona de la localidad de Bellaco aflora la Fm. Bellaco, la cual se distingue por ser una sucesión sedimentaria que presenta pelitas y arcillas yesíferas (Bossi et al., 1998). La línea de flujo P9 – P4 muestra un enriquecimiento de sulfatos, lo cual podría deberse a la posible incidencia de esta formación geológica. Esto resulta coherente con el estudio piezométrico, que también sugiere que la zona de Bellaco podría ser una zona de recarga de la cuenca sur.

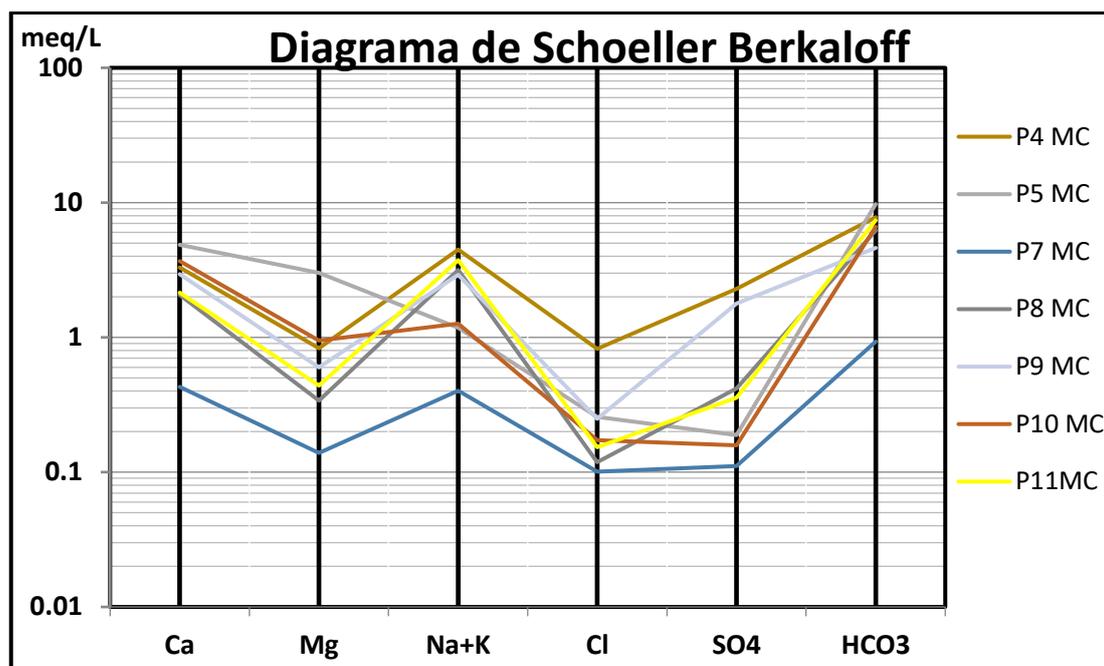


Figura 5-22: Diagrama de Schöeller Berkaloff de los pozos muestreados.

El pozo P7 se encuentra en el inicio de la subcuenca centro, su perfil geológico indica un espesor de 50 metros de arenas y areniscas que parecen pertenecer a la Fm. Salto, caracterizada por areniscas, areniscas conglomerádicas y ocasionales niveles pelítico – arenosos afectados por fuertes procesos de silicificación. La hidroquímica de las aguas de esta perforación muestra una menor concentración iónica que el resto de las aguas subterráneas, pero coincidente con la concentración iónica del curso de agua más cercano, correspondiente al punto S5. Se destacan valores de concentración de aluminio, manganeso y hierro por encima de los valores de las demás aguas subterráneas de la cuenca (Tabla 17). La conductividad eléctrica del agua de esta perforación es de 107 $\mu\text{s}/\text{cm}$, mientras que para el resto de las aguas subterráneas el rango de CE oscila entre 495 y 865 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Lo cual parece mostrar agua de escorrentía de lluvia local infiltrada muy rápidamente, quizás a través del espacio anular del pozo. Otra posibilidad es que esta rápida infiltración se asocie a la litología local, en la que predomina una formación arenosa que aflora en superficie y se extiende a lo largo de todo el perfil del pozo.

El pozo P5 muestra un incremento significativo en la concentración de calcio y de magnesio respecto al resto de las aguas subterráneas. La concentración del ion sodio en este pozo es baja, pero la concentración del ion potasio es más alta respecto a otros pozos, lo cual podría asociarse con una mayor alteración del medio geológico. A su vez, presenta concentraciones de algunos metales más elevadas que en el resto de las aguas subterráneas (Anexo 10.3.2). El estroncio se encuentra entre 2 a 4 veces más concentrado que en el resto de las aguas y presenta la concentración de sílice más alta de las aguas muestreadas.

En la Figura 5-23 se muestran las concentraciones iónicas de aguas subterráneas y de las aguas de los cursos superficiales menores. A excepción de las aguas del pozo P7 y del agua superficial S5, el resto de las aguas parecen tener composiciones iónicas similares. Es decir, que los cursos de agua S1, S3 y S4 muestran en su composición iónica, una clara influencia del agua subterránea de la zona al momento del muestreo. Esto parece ser

coherente con la piezometría, la cual indica que el acuífero descarga en los cursos de agua de la cuenca. Si el análisis se realiza considerando la división entre las 3 subcuencas, se observa que el agua del curso S4 es la que tiene mayor concentración de sodio en su composición, al igual que las aguas subterráneas P8 y P11 ubicadas en la misma subcuenca (sur).

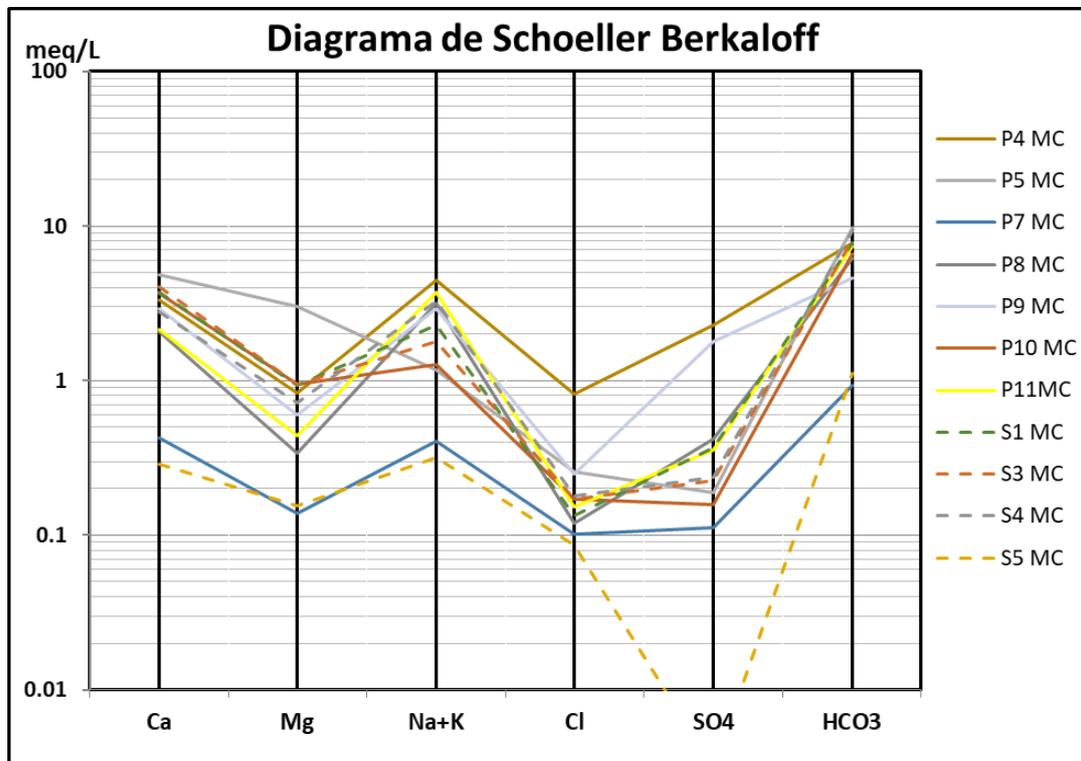


Figura 5-23: Diagrama de Schöeller Berkloff para las aguas subterráneas y aguas de cursos menores.

El punto de muestreo S5 es un punto ubicado sobre las nacientes de una cañada que desemboca a un arroyo que descarga al humedal. El punto S1 es tomado en el mismo arroyo más cerca de la zona de descarga. Si se analiza la composición iónica del punto S5 respecto al S1, se observa que los valores de concentración iónica en S5 son bajos y reflejan una composición similar al agua de lluvia con algunos efectos de concentración por evaporación (esto es confirmado por la isotopía). Mientras que en el tramo final del curso de agua (S1), la composición iónica es similar a la composición del agua subterránea de la zona. Se observa un enriquecimiento significativo de todos los iones, destacándose el enriquecimiento en bicarbonatos, calcio, sodio, potasio, magnesio y sobre todo en sulfatos. La conductividad eléctrica en S5 es de 72 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y en S1 alcanza valores de 604 $\mu\text{s}/\text{cm}$, mostrando un incremento de este parámetro hacia aguas abajo del curso, explicado por el aporte de aguas subterráneas de descarga. La conductividad eléctrica de las aguas subterráneas de la zona oscila en el entorno de los 600 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

La composición hidroquímica de las lagunas (LG1 y LC1) muestra diferencias respecto al resto de las aguas. Las concentraciones iónicas son sensiblemente menores a los encontrados en las aguas subterráneas y en las aguas de los cursos superficiales. Se observan además valores diferentes al resto de las aguas en las concentraciones de sodio.

Es probable que, en este muestreo, el agua de las lagunas refleje una componente importante de agua de lluvia producto de las precipitaciones más próximas a la fecha de realizado el mismo. Según el testimonio de los guardaparques, existen períodos de estiaje muy severos, que se dan cada 5 o 6 años en lo que las lagunas muestreadas llegan a secarse casi por completo. Según experiencias de los guardaparques locales, en esos momentos se pueden observar ciertos borboteos de agua en algunas zonas del fondo de las lagunas.

El agua subsuperficial tomada en la zona del humedal (I1) fue tomada realizando un cateo de 1 metro y medio de profundidad. El nivel estático se ubicó a 1 metro de profundidad aproximadamente. La composición química de esta muestra refleja una concentración iónica similar al agua subterránea (P5). La conductividad eléctrica de esta muestra fue de 318 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Esto podría indicar que el nivel freático en el humedal depende de la descarga del SAM a través de la Fm. Fray Bentos.

5.6.3 Aproximación a los procesos hidrogeoquímicos dominantes

En la Figura 5-24 se analizan algunos entornos de estabilidad generales para los grupos de minerales que están más presentes en el paquete sedimentario que compone el medio geológico de la cuenca en estudio. Esto permite identificar algunos procesos hidrogeoquímicos principales que puedan estar ocurriendo en el sistema de flujo. Para ello, se utilizaron las relaciones molares (Ca/Na) vs (HCO_3/Na) propuestas por Clark (1997).

La Figura 5-24 muestra los resultados de las relaciones (Ca/Na) vs (HCO_3/Na), se observa que el proceso de alteración de silicatos tiene control sobre la química del agua subterránea del PNEF, sobre todo en las aguas más profundas del sistema correspondientes a líneas de flujo que circulan por la Fm. Mercedes, ya que los valores menores y cercanos a 1 en la relación Ca/Na sugieren dicho proceso (Clark, 1997). Sin embargo, es notable que el grupo de las aguas de la zona de recarga (ZR) presenta un aumento en las concentraciones de Ca, el cual tiene relación con el proceso de disolución de carbonatos, como se ha visto en los diagramas anteriores. Las aguas de los pozos más someros, de los arroyos y del humedal (a excepción de I1) muestran una transición entre las relaciones iónicas que indican el predominio de procesos de alteración de silicatos y de disolución de carbonatos.

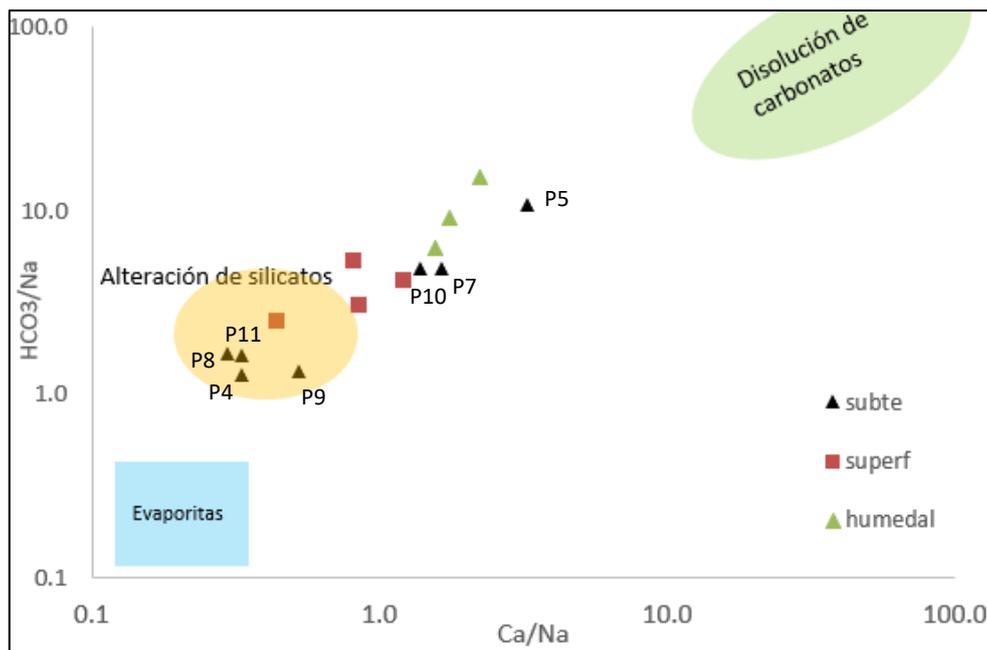


Figura 5-24: Diagrama de relaciones (Ca/Na) vs (HCO₃/Na) según fuente.

Por último, se realizaron diagramas scatter buscando relacionar de a pares la evolución de aquellos parámetros de interés. En la Figura 5-25 a Figura 5-28 se muestran los diagramas bidimensionales obtenidos.

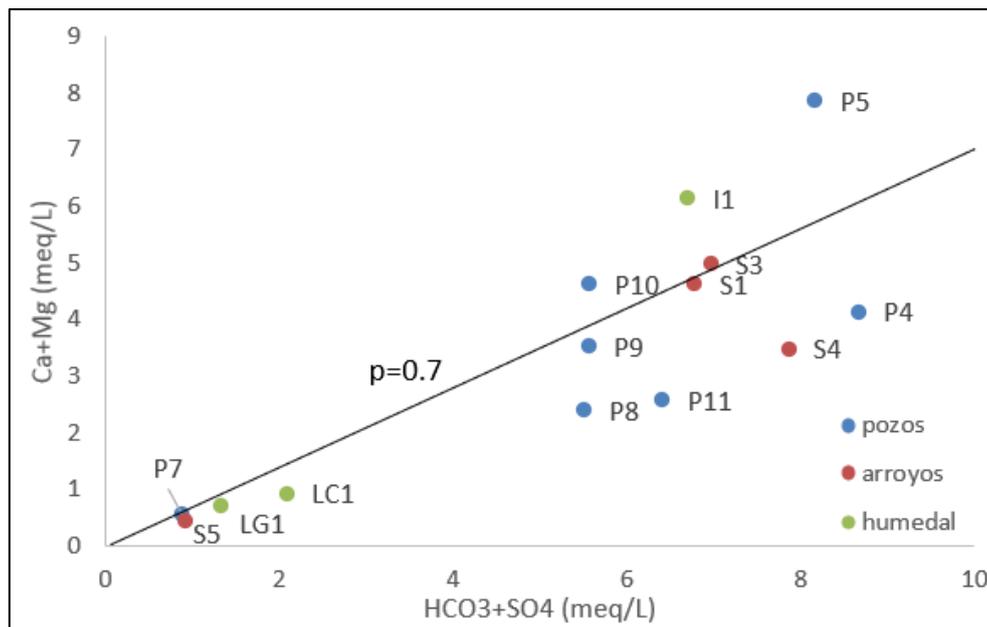


Figura 5-25: Diagrama bidimensional (HCO₃ + SO₄) vs (Ca + Mg)

El diagrama de la Figura 5-25 puede sugerirnos si la presencia de bicarbonatos en el agua proviene de la meteorización de silicatos o de la disolución de carbonatos. Según Jalali (2005) si la pendiente de la recta de regresión es mayor a 0.7 es probable que se deba a la disolución de carbonatos, en cambio si la pendiente de la recta de regresión es menor a 0.7, el aporte de bicarbonatos se debe a la intemperización de silicatos. En este caso, no existe una tendencia clara de todas las muestras hacia uno de los procesos. Al observar la agrupación de las muestras en el diagrama y según la mineralogía de las formaciones geológicas de la zona es probable que se estén llevando a cabo ambos

procesos en el sistema de flujo. Por un lado, debido a que todas las formaciones presentan carbonato de calcio en diferentes formas, resulta altamente probable que se estén solubilizando carbonatos en el sistema. Además, debido a la mineralogía presente, es probable que se genere la alteración de silicatos en las líneas de flujo más profundas donde el flujo es más lento. Ciertos pozos muestran una relación $(\text{HCO}_3 + \text{SO}_4) / (\text{Ca} + \text{Mg})$ menor a 0.7 que pareciera afirmar esta hipótesis. No obstante, se debe notar que es probable que se den simultáneamente importantes procesos de intercambio iónico entre el agua y el medio geológico, proceso que se analiza más adelante en este trabajo.

En la Figura 5-26 se muestra la relación entre el ion bicarbonato y el ion calcio expresada en mmol/L. La disolución de minerales de carbonato como la calcita es probablemente la reacción de intemperización más común en acuíferos que circulan por medios que presentan estos minerales. Teóricamente, la disolución de calcita introducirá Ca^{2+} y HCO_3^- en las aguas subterráneas en una proporción (mmol/L) de 1:1 (Li et al., 2013). En el gráfico de la Figura 5-26 se observa que todas las muestras se ubican debajo de la línea 1:2, esto sugiere que la disolución de calcita probablemente no sea la única fuente de HCO_3^- . No se puede descartar que la alteración de silicatos sea la otra fuente de ion HCO_3^- , aunque esto parece poco probable dada la lentitud de este proceso. Por lo que, el déficit de Ca podría estar asociado al intercambio catiónico entre el agua subterránea y el terreno. No obstante, algunas muestras de aguas subterráneas de la Fm. Mercedes parecen encontrarse en el campo de estabilidad de alteración de silicatos (Figura 5-24), por lo que para dar respuesta certera a lo anterior se debe incurrir en una modelación hidrogeoquímica que trasciende el alcance de este trabajo.

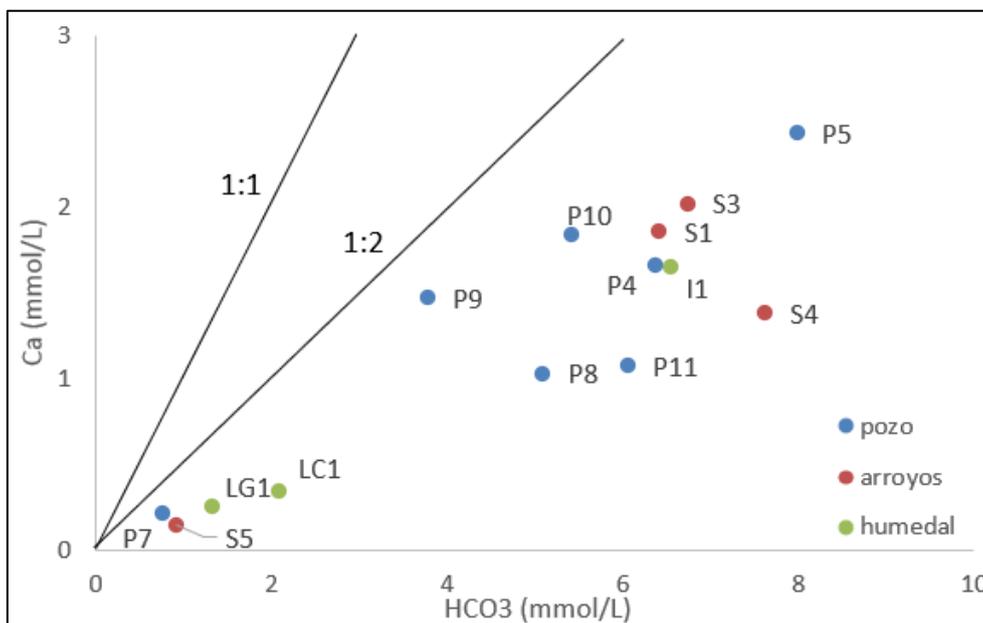


Figura 5-26: Diagrama bidimensional HCO_3 vs Ca.

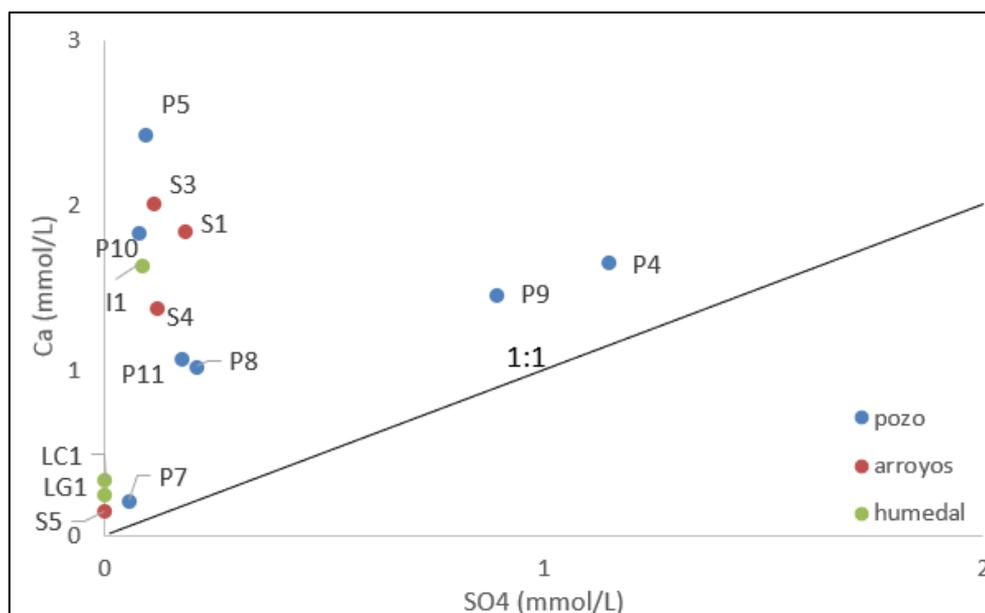


Figura 5-27: Diagrama bidimensional SO_4 vs Ca.

La Figura 5-27 muestra la relación entre el ion calcio y el ion sulfato para todas las muestras analizadas. La disolución de yeso aporta una cantidad igual de moles de Ca^{2+} y SO_4^{2-} en las aguas subterráneas (Li et al., 2013). En la Figura 5-27 se observa que todas las muestras se encuentran por encima de la línea 1:1, lo que indica que, si existiera disolución de yeso, esta no sería la única fuente de calcio. Queda claro que la disolución de carbonatos es la principal fuente de Ca^{2+} en el agua subterránea. Los pozos P4 y P9 presentan mayores concentraciones de sulfato respecto al resto de las aguas y están más cerca de la línea 1:1. Es probable que en estos pozos el proceso de disolución de yeso sea relevante. El pozo P4, se encuentra en una zona de fallamiento y capta agua de formaciones más profundas (Fm. Guichón y Fm. Mercedes) probablemente presente líneas de flujo con mayor tiempo de tránsito en el sistema. Mientras que el pozo P9 se encuentra ubicado cerca de un afloramiento de la Fm. Bellaco, la cual presenta recristalización de yeso en cristales cuyo tamaño en términos generales aumenta hacia abajo aunque disminuyendo su cantidad (Bossi et al., 1998).

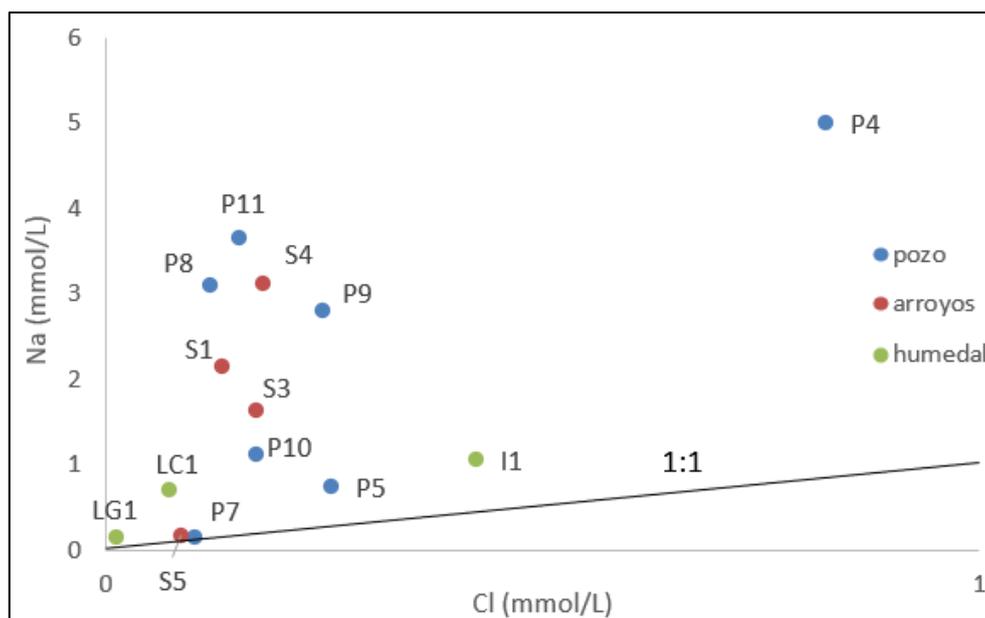


Figura 5-28: Diagrama bidimensional Na vs Cl.

En la Figura 5-28 se grafica la relación entre el ion Na^+ y el ion Cl^- . Las posibles fuentes de Na^+ en el agua subterránea son el intercambio iónico y disolución de arcillas o minerales silicatados que lo contienen, como lo son las plagioclasas. La disolución de halita es una de las fuentes más comunes de Na^+ y Cl^- . Teóricamente, la disolución de halita libera cantidades iguales de Na^+ y Cl^- en la solución (Li. et al., 2013). Sin embargo, todas las muestras se encuentran por encima de la línea teórica 1:1. Por lo que, existe una fuente adicional de Na^+ . Se podrían atribuir mayores proporciones de Na/Cl a la disolución de otros minerales sódicos. No obstante, el proceso de intercambio catiónico que se analiza con el gráfico de la Figura 5-29 parece jugar un papel importante en la composición hidroquímica de las aguas subterráneas más evolucionadas del sistema.

En la Figura 5-29 se grafican las relaciones entre los iones $(\text{Ca}+\text{Mg}-\text{HCO}_3-\text{SO}_4)$ y los iones $(\text{K}+\text{Na}-\text{Cl})$, este gráfico ayuda a evidenciar si existe intercambio iónico en el medio. Si los puntos de las muestras se alinean en una recta con pendiente igual a -1, existe intercambio iónico (Li. et al., 2013). En la Figura 5-29 se observa que la línea de regresión se ajusta a una pendiente de -0.92 con un $R^2= 0.87$. Esto demuestra la existencia de procesos de intercambio iónico entre el agua subterránea y las arcillas del medio geológico, donde se fijan iones de Ca^{2+} a las arcillas y estas liberan iones de Na^+ al agua. Este proceso se ve acentuado en los pozos que captan aguas de la Fm. Mercedes y representan las aguas con mayor evolución iónica del sistema (P8, P11 y P4).

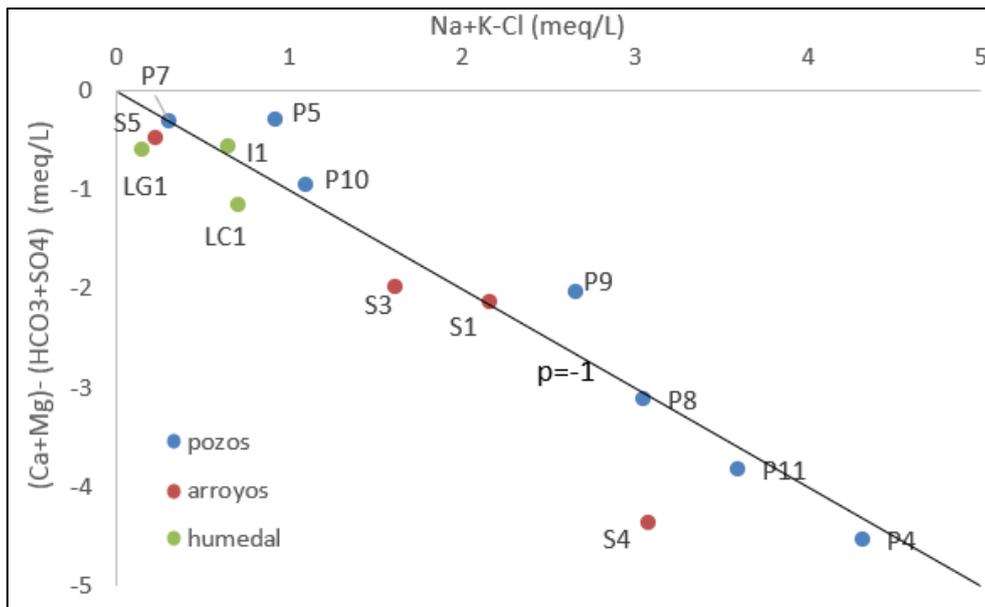


Figura 5-29: Diagrama bidimensional (Ca+Mg) - (HCO3+SO4) vs (Na+K-Cl).

5.6.4 Isotopía

En la Figura 5-30 se graficaron los valores de deuterio respecto a los valores de oxígeno 18 de todas las muestras junto a la línea meteórica de la ciudad de Buenos Aires (Dapeña y Panarello, 2007) para analizar los resultados obtenidos.

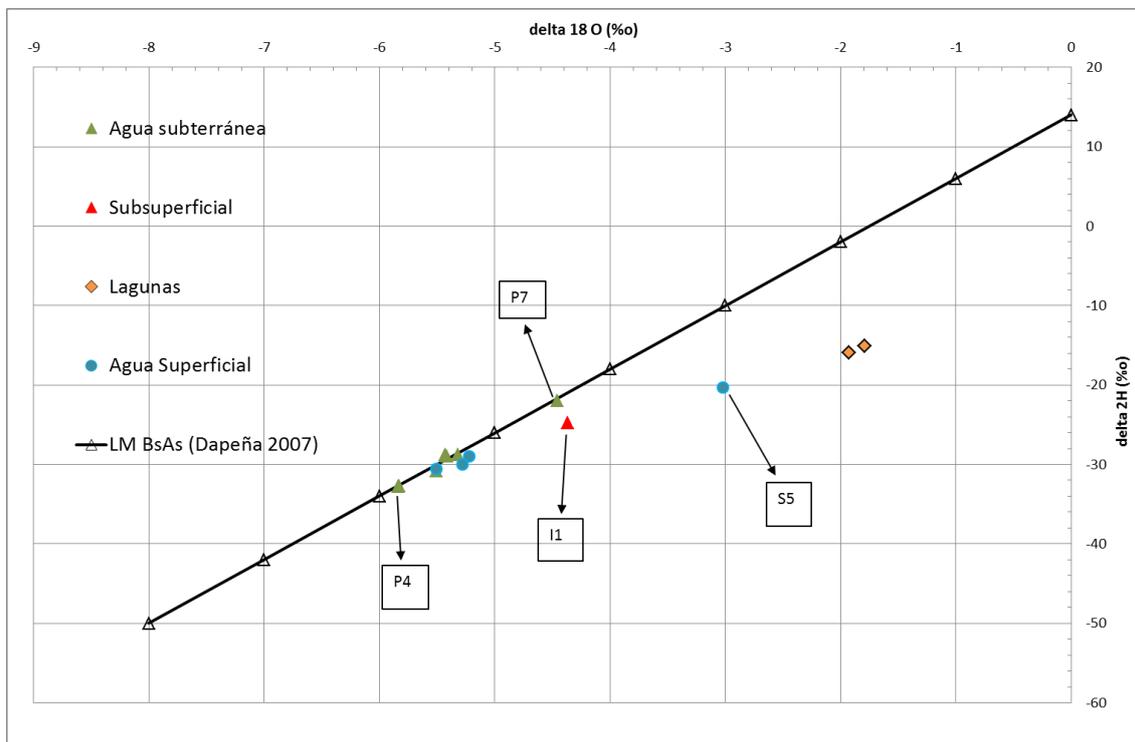


Figura 5-30: Representación de los valores isotópicos para las muestras analizadas.

Todas las muestras de agua subterránea se localizan sobre la línea meteórica de agua de lluvia local. Las aguas superficiales S1, S3 y S4 muestran la misma marca isotópica con una leve evaporación. Esto confirma algo ya conocido que es que el agua que circula por todo el sistema hidrogeológico SAM es agua de lluvia local (De los Santos et al., 2020).

Las muestras I1, S5, LC1 y LG1 se ubican sobre una recta de pendiente igual a 4. Esto indica que estas aguas son aguas de lluvia local evaporadas. Esto es un resultado de esperar ya que la muestra I1 pertenece a una muestra del agua del humedal tomada a 1 m de profundidad, en una zona de gran vegetación. El agua subsuperficial es evapotranspirada a través de la cubierta vegetal del humedal. El punto S5, es agua de una cañada en el inicio de cuenca. En el sitio de toma de la muestra el flujo presentaba un caudal muy bajo y la hidroquímica no refleja aporte de agua subterránea, tratándose de un drenaje superficial encauzado. Los puntos LC1 y LG1 corresponden a dos lagunas semipermanentes de la zona del humedal y presentan un grado de evaporación del agua de lluvia elevado, lo cual es coherente por tratarse de un cuerpo de agua de superficie libre. En esta campaña de muestreo no se observa un aporte significativo de agua subterránea en las lagunas, según la evaluación hidroquímica. En cambio, esto si ocurre en el punto I1 perteneciente al nivel freático del humedal.

Las aguas subterráneas de los pozos P4, P5, P8, P10 y P11 muestran una marca de agua de lluvia local isotópicamente ligera, esto podría significar que el mayor volumen de recarga se da en eventos de invierno cuando el fraccionamiento del agua de lluvia por evaporación es menor. En cambio, el pozo P7 muestra un agua isotópicamente más pesada al resto de las aguas subterráneas, esto podría indicar que la frecuencia de recarga de estas aguas es mayor y se debe a una condición geológica local, esto es coherente con los datos hidroquímicos que muestran una marcada diferencia en la hidroquímica del punto P7 respecto de las restantes muestras de agua subterránea. Es probable que este pozo esté captando agua de lluvia recientemente infiltrada. Esto es consistente con la baja mineralización, el enriquecimiento isotópico, el bajo pH (como las aguas de lluvia) y la temperatura, levemente más elevada que en el resto de los pozos.

5.7 Modelo Conceptual

Un modelo conceptual es una representación gráfica del sistema de flujo del agua subterránea, que se realiza incorporando toda la información geológica e hidrogeológica disponible en un simple esquema del modelo a realizar (Anderson y Woessner, 1992).

La zona de estudio actual forma parte del Sistema Acuífero Mercedes (SAM), conformado por tres formaciones sedimentarias diferentes (Fm. Asencio, Fm. Mercedes y Fm. Guichón.), de granulometría y consolidación distintas, donde sus cualidades hidráulicas varían mucho lateralmente y en profundidad (De los Santos et al., 2020).

En el sector del SAM que conforma el área de estudio del presente trabajo, las perforaciones analizadas muestran la existencia de estas mismas formaciones como principales unidades acuíferas. También existen algunas perforaciones que explotan únicamente la Fm. Salto y la Fm. Fray Bentos.

En el caso de Fm. Salto, la misma no presenta tanta importancia como unidad acuífera comparada con las demás formaciones, ya que se presenta aflorando hacia el este sobre el límite del área de estudio. En cuanto a la Fm. Fray Bentos, esta se encuentra presente casi en la totalidad del área de estudio sobreyaciendo a la Fm. Asencio. Los pozos que explotan exclusivamente esta formación presentan caudales específicos del orden de $0.45 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

Para las perforaciones que atraviesan la Fm. Asencio y/o Fm. Mercedes, los caudales específicos varían entre 0.1 y 5.5 m³/h/m, lo cual evidencia el potencial acuífero de estas dos formaciones, las principales del SAM. Finalmente, solo una escasa cantidad de pozos finalizan en litologías que se pudieran asociar con la Fm. Guichón. Debido a la falta de datos y de antecedentes en la zona no es posible asociar esta formación con un caudal extractivo. De todas formas, en los pozos que alcanzan esta litología, fueron ubicados filtros de hasta 6 metros para captar agua a estas profundidades.

En cuanto a la geometría del acuífero en la zona de estudio, la Fm. Mercedes y la Fm. Asencio presentan un basculamiento hacia el oeste, donde la cota de techo de ambas formaciones se profundiza en el entorno de 50 m.

Haciendo énfasis en la geología en las inmediaciones del PNEF, en un perfil litológico pueden encontrarse sedimentos finos de la Fm. Fray Bentos, del orden de tres o cuatro decenas de metros en las cercanías de San Javier. Seguido en profundidad, se aprecia la potencia de la Fm. Asencio, con potencias registradas del orden de veinte a treinta metros en la zona de San Javier, disminuyendo su potencia hacia el sur, con registros del orden de 10 m en las cercanías del ingreso del Arroyo del Sauce a los esteros.

Por último, no se cuenta con registros de pozos en los que se indique la presencia de la Fm. Mercedes en las inmediaciones del PNEF, aunque se infirió su presencia mediante el relevamiento geofísico realizado en el sitio 6, aproximadamente 10 km al sur del corte 3.

El relevamiento del sitio EdF04 (Fm. Mercedes) y su proximidad al PNEF, no puede tomarse como factor categórico para definir la presencia de esta formación en forma significativa en subsuelo, así como tampoco para definir su aporte al flujo subterráneo con respecto al humedal.

Tomando como base la información geológica brindada por las perforaciones estudiadas y los perfiles geofísicos analizados, se estima que la Fm. Fray Bentos es la que subyace a la zona de humedales presente en la costa del Río Uruguay, por lo tanto, la que podría descargar en forma directa el agua subterránea hacia el humedal.

En cuanto al comportamiento hidráulico, el flujo principal se da en dirección este oeste, desde la zona alta de la cuenca del área de estudio, hacia la ubicación del PNEF, donde se ubica la zona de descarga. En la zona de tránsito, el acuífero descarga hacia los cursos de agua menores, como el Arroyo Isletas y el Arroyo Cañada del Sauce, afluentes al PNEF. La recarga se da por infiltración de agua meteórica local a través de la Fm. Salto y Fm. Fray Bentos con gran desarrollo en superficie. Las variaciones en las características litológicas de la Fm. Fray Bentos generan la existencia de flujos de descarga local, en aquellas zonas donde la formación es menos permeable.

La composición hidroquímica e isotópica apoyan la hipótesis de descarga de agua subterránea hacia los cursos principales de la cuenca de aporte a los esteros. A medida que se avanza en el flujo superficial se evidencia una composición química del agua de los arroyos cada vez más similar a la del agua subterránea. En particular las aguas de los arroyos cercanas al humedal muestran la misma marca isotópica del agua subterránea. Implicando la existencia de un flujo base significativo en época de estiaje, desde el acuífero a los cursos de agua que aportan a los humedales.

La composición isotópica muestra que todas las aguas provienen de agua meteórica local, observándose posibles procesos de evaporación en las aguas del humedal.

En general, las aguas de la cuenca son bicarbonatadas cálcicas a sódicas. Los principales procesos que parecen dominar la composición hidroquímica del sistema hidrogeológico son la disolución de carbonatos, alteración de silicatos y posibles procesos de mezcla.

Las lagunas semipermanentes existentes en el humedal reciben aportes de lluvia local y del Río Uruguay durante los eventos de crecida. Con el conocimiento actual, no puede asegurarse que las lagunas reciban aportes significativos de agua subterránea. No obstante, existe evidencia de que el agua del nivel freático del humedal tiene una fuerte componente subterránea.

En la Figura 5-31 se presenta un esquema del modelo conceptual planteado.

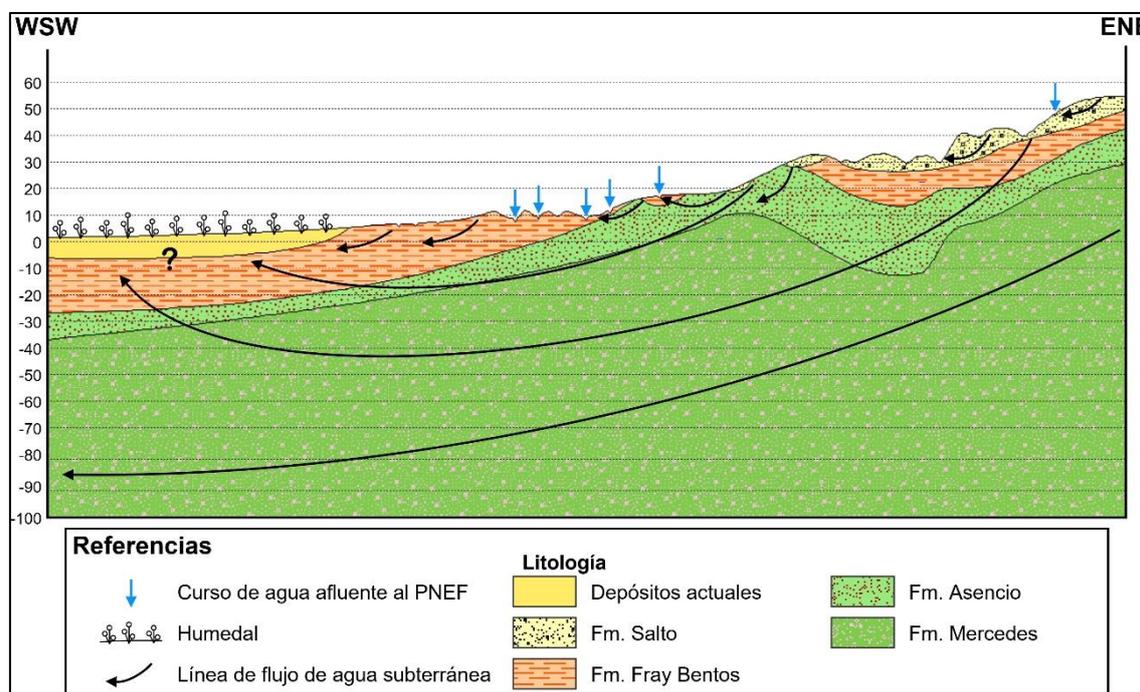


Figura 5-31: Representación del modelo conceptual.

6 Discusión

Parte del desarrollo del presente trabajo comprendió el estudio de la geología del subsuelo, con el objetivo de establecer el modelo físico del área de estudio. Para esto se elaboraron tres cortes utilizando información de perforaciones con perfiles litológicos e información geofísica relevada. La falta de perforaciones fue una limitante para la elaboración de nuevos cortes en el sector centro y sur del área de estudio.

A partir de los cortes geológicos, fue posible identificar el basculamiento tectónico de las litologías sedimentarias preoligocénicas (Fm. Mercedes y la Fm. Asencio, ambas del Cretácico Superior), definiendo el buzamiento hacia el suroeste. Los registros de perforaciones detallan su presencia a 30 o 40 m de profundidad en las cercanías del PNEF. Sin embargo, se relevaron dos afloramientos de metareniscas y metaconglomerados silicificados pertenecientes a la Fm. Mercedes hacia el oeste de la zona de estudio. Estas observaciones contradicen al modelo conceptual de estratos con

buzamiento al suroeste, que proyecta un hundimiento hacia el oeste de la Fm. Mercedes. Se entiende que es necesario profundizar en este aspecto en trabajos futuros, mediante el relevamiento de nuevos afloramientos, la incorporación de perforaciones que aporten nueva información y la realización de un relevamiento geofísico en detalle.

Las técnicas geofísicas utilizadas permitieron identificar y establecer la distribución y la geometría de las formaciones geológicas en algunos sitios donde existían faltantes de información, debido al alcance y detalle de los mapas geológicos disponibles y el banco de datos de perforaciones. Utilizando una perforación con un detallado perfil litológico, fue posible establecer valores de referencia en la respuesta geoeléctrica de las distintas unidades, para posteriormente extrapolar dichos resultados a otros sitios.

Los valores de resistividad obtenidos para cada formación identificada son estables en los diferentes sitios a pesar de la metodología utilizada, lo que refuerza la validez de las interpretaciones realizadas. Si bien el número de relevamientos geofísicos realizados no permite definir rangos de resistividad característicos de cada formación con valor estadístico, los resultados obtenidos servirán de insumo para la conformación de una base de datos, que pueda aportar a una futura caracterización geoeléctrica de las formaciones existentes con interés hidrogeológico.

El relevamiento piezométrico realizado permitió definir el comportamiento hidráulico del sistema, definir la dirección principal de flujo, las principales zonas de descarga del sistema y en menor medida identificar posibles zonas de recarga.

Conociendo el gradiente hidráulico, la geometría promedio del acuífero y la conductividad hidráulica del medio es posible realizar, mediante la formulación de Darcy, estimaciones del flujo de descarga al Río Uruguay y cursos menores. El hecho de que el grado de incertidumbre era muy elevado también generó que se optara por no realizar el balance hídrico. Se considera que en futuros trabajos se deberá realizar esta cuantificación para aportar al modelo conceptual así como a un modelo matemático de flujo.

El uso de técnicas hidrogueoquímicas e isotópicas permitió verificar algunas hipótesis planteadas y algunos resultados parciales obtenidos en el estudio piezométrico acerca del movimiento de las aguas y la interrelación entre aguas superficiales y subterráneas.

En este trabajo no se profundizó en el análisis de las concentraciones obtenidas de metales traza, simplemente se analizaron para generar una base de datos de información hidroquímica completa no existente hasta el momento para la zona de estudio.

En las subcuencas centro y sur, se evidencia una incidencia de la formación geológica yesífera (Fm. Bellaco). Esto podría evidenciar zonas de recarga local que no habían sido advertidas por otras técnicas de estudio. Para determinar que la zona de la Fm. Bellaco es una zona de recarga local sería necesario extender el área del relevamiento piezométrico.

Se han determinado algunos efectos locales de interés. Un ejemplo de ello es la muestra superficial S5 y el pozo P7, que se encuentran en el inicio de la subcuenca centro. Estos puntos muestran composiciones iónicas diferentes al resto de las muestras. El perfil geológico del pozo P7 indica un espesor de 50 metros de arenas y

areniscas que parecen pertenecer a la Fm. Salto. Esto podría justificar la composición iónica de estas muestras, pero sería necesario realizar un relevamiento en detalle en esa zona. Otro ejemplo es el pozo P5, el cual muestra un incremento significativo en la concentración de calcio y de magnesio respecto al resto de las aguas subterráneas. A su vez, presenta concentraciones de algunos metales más elevadas que las demás muestras. Dado que solamente este pozo ha evidenciado estos cambios hidroquímicos, es probable que se trate de un efecto local que podría estudiarse en una siguiente etapa, realizando una inspección detallada del pozo y analizando la hidroquímica en pozos cercanos para evaluar de qué tipo de anomalía se trata. No obstante, estos resultados pueden ser coherentes con una mayor alteración del medio geológico.

La composición hidroquímica de las lagunas (LG1 y LC1) muestra diferencias respecto al resto de las aguas. Las concentraciones iónicas son sensiblemente menores a los encontrados en las aguas subterráneas y en las aguas de los cursos superficiales. Se observan además relaciones diferentes al resto de las aguas en las concentraciones de sodio. Es probable, que en este muestreo, el agua de las lagunas refleje una componente importante de agua de lluvia, producto de las precipitaciones cercanas a la fecha de realizado el mismo.

La composición química del agua subsuperficial tomada en la zona del humedal (I1) refleja una concentración iónica que parece indicar que se trata de agua subterránea con procesos de evaporación según el análisis isotópico. Esto podría determinar un posible vínculo del agua subterránea y el nivel freático somero (donde se sustenta el humedal) a través de la Fm. Fray Bentos. De todos modos, este es un resultado primario y es necesario profundizar en el estudio para poder aseverar esta hipótesis.

Las aguas subterráneas de los pozos P4, P5, P8, P10 y P11 muestran una marca de agua de lluvia local isotópicamente ligera, esto podría significar que el mayor volumen de recarga al acuífero se da en eventos de invierno cuando el fraccionamiento del agua de lluvia por evaporación es menor. Aunque para afirmar esta hipótesis se deberían generar datos isotópicos estacionales para las lluvias.

Se evidencia un posible vínculo del agua subterránea con el humedal a través del nivel freático. No obstante, el sistema se vuelve muy heterogéneo y complejo por la presencia del Río Uruguay, canales drenantes y desembocadura de cursos menores en esa zona. Para comprender mejor y determinar con exactitud la interrelación entre el agua subterránea y el humedal es necesario contar con un mayor volumen de información. El número de puntos muestreados es escaso y al ser un sistema hidrogeológico heterogéneo, es recomendable extender el número de puntos a muestrear, sobre todo en zonas del humedal, realizando muestreos en diferentes estaciones.

Para determinar con exactitud los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en el medio se requiere realizar una modelación hidrogeoquímica. Para ello, se necesita más información y excede el alcance del presente trabajo.

En base a las metodologías aplicadas se logró desarrollar un primer modelo conceptual en el área de incidencia del PNEF. Para mejorar el modelo conceptual hidrogeológico es necesario avanzar en la cuantificación de la recarga en la zona de estudio. Debido a la información existente no fue posible realizar una cuantificación de los volúmenes de recarga y balance hídrico. Sería de interés profundizar en este aspecto en futuros trabajos para generar un insumo para un modelo de flujo. Las posibles zonas

de interés para evaluar la recarga podrían ser zonas donde los suelos presentan mayor velocidad de infiltración y por lo tanto mayor incidencia en la recarga. En el caso de la zona de estudio los suelos no se caracterizan por presentar alta velocidad de infiltración (Grupos C y D). Sin embargo, sería de interés evaluar la incidencia en la recarga de las zonas cubiertas por los suelos Tres Bocas debido a su distribución espacial y su mayor capacidad de infiltración respecto a los suelos que se encuentran sobre los humedales.

Debido a la escala de trabajo, no se realizó un análisis en detalle de la posible incidencia de la forestación en la zona Sur del área de estudio, donde tiene su mayor desarrollo esta actividad productiva. El aumento del área forestada puede incidir en los caudales de aporte de la cuenca a la zona de humedales principalmente en épocas de estiaje como plantea Silveira et al. (2016).

La discusión planteada anteriormente evidencia la necesidad de profundizar en algunos aspectos que permitirán revisar el modelo conceptual y mejorar el entendimiento del funcionamiento hidrogeológico del sistema.

7 Conclusiones

El presente estudio ha permitido recopilar y generar información hidrogeológica en una zona de alto valor ecosistémico en el territorio nacional, como lo es el PNEF. Esta información podrá ser utilizada por los diferentes organismos de gestión del territorio y recursos y por la comunidad e instituciones académicas en futuras investigaciones.

En la zona de estudio se desarrolla un sistema acuífero conformado por las formaciones (de base a tope) Guichón, Mercedes, Asencio, Fray Bentos, Salto, Bellaco, Libertad, Dolores y depósitos actuales, con carácter libre en forma general, pudiendo presentar carácter semiconfinado en algunas zonas no identificadas, teniendo en cuenta las litologías que lo componen, en especial las variaciones de la Fm. Fray Bentos, la cual podría officiar de confinante en algunas zonas.

Se estima que la Fm. Fray Bentos es la que subyace a la zona de humedales presente en la costa del Río Uruguay. Por lo tanto, sería la formación que podría descargar en forma directa el agua subterránea hacia el humedal.

En cuanto a la dinámica del agua subterránea, se identifica que existen dos divisorias de aguas bien marcadas por la piezometría, dividiendo la cuenca en tres subcuencas. Se observa la interacción del acuífero con los cursos de agua superficiales menores, los cuales officiarían, al igual que el Río Uruguay, de zonas de descarga del acuífero.

Este primer estudio isotópico e hidroquímico de las aguas del PNEF ha permitido verificar algunas hipótesis planteadas y algunos resultados parciales obtenidos en el estudio piezométrico, acerca del movimiento de las aguas y la interrelación entre aguas superficiales y subterráneas. A su vez, ha permitido evidenciar algunos nuevos aspectos de interés para el modelo conceptual hidrogeológico de la zona de estudio. Como podría ser la incidencia de la Fm. Bellaco en la composición iónica de las aguas de las subcuencas centro y sur.

Las aguas subterráneas de la cuenca del PNEF son bicarbonatadas cálcicas a sódicas. La composición química de las aguas subterráneas y superficiales permite determinar que los cursos menores de la cuenca presentan un flujo base proveniente de la descarga del acuífero, evidenciándose una posible descarga indirecta del agua subterránea a través de los cursos en la zona del humedal.

El análisis isotópico refleja que todas las muestras de agua subterránea se localizan sobre la línea meteórica de agua de lluvia local. Algunas muestras superficiales evidencian procesos de evaporación, como sucede con las muestras de agua tomadas en las lagunas, las cuales parecen ser aguas de lluvia local evaporadas.

El cambio de uso de suelo en la cuenca de aporte puede generar cambios en el balance de agua y solutos del sistema. Por este motivo, es imprescindible conocer el modelo conceptual hidrogeológico de un área protegida con alto valor ecosistémico con el objetivo de gestionar de manera adecuada los recursos hídricos y prever el impacto que los cambios de uso de suelo pueden provocar en el sistema.

Los resultados obtenidos muestran los beneficios en la utilización de técnicas complementarias para el estudio hidrogeológico en una zona en particular.

8 Recomendaciones o acciones futuras

Para comprender mejor y determinar con exactitud la interrelación entre el agua subterránea y el humedal es necesario contar con un mayor volumen de información, dado que el sistema se vuelve muy heterogéneo y complejo por la presencia del Río Uruguay, canales drenantes y desembocadura de cursos menores en esa zona.

Como futuras investigaciones en la zona, es necesario incorporar un muestreo continuo de niveles piezométricos en la zona cercana al humedal y dentro del humedal para poder establecer si efectivamente existe correlación. También sería necesario poder medir de manera continua los caudales de los cauces superficiales que atraviesan el humedal e interactúan con el Río Uruguay, o bien la realización de campañas puntuales de aforo que sirvan de insumo para calibrar modelos de escurrimiento para cuencas no aforadas.

Desde el punto de vista del modelo físico, sería necesario realizar estudios geológicos en detalle y mediciones geofísicas dentro de los humedales, con el propósito de definir las características de las litologías que conforman la base del humedal.

También se requiere un estudio en detalle de afloramientos en la totalidad de la zona, con la finalidad de describir las litologías presentes y las características estructurales del registro geológico.

Respecto a los estudios geofísicos es importante realizar un estudio de parametrización de valores geoelectrónicos con peso estadístico para establecer con menor incertidumbre los rangos de resistividad de las formaciones geológicas existentes en la zona. También sería importante realizar estudios para delimitar de mejor manera los afloramientos de la Fm. Asencio y Fm. Mercedes y la posible incidencia de fallas geológicas que conecten hidráulicamente las distintas formaciones. También sería necesario tener una mayor cobertura espacial de la información geofísica, principalmente en la zona sur, que permita comprender de mejor manera el modelo físico en esta zona ante la ausencia de perfiles litológicos.

En trabajos futuros, sería recomendable incorporar la realización de pruebas de bombeo que permitan caracterizar los parámetros hidráulicos para cuantificar el flujo subterráneo de descarga hacia el humedal. En particular, resulta de interés la realización de ensayos de bombeo en pozos someros que exploten la Fm. Fray Bentos en las inmediaciones del humedal.

Si bien el aporte de información hidroquímica e isotópica ha resultado valioso en esta etapa, es recomendable extender el número de puntos a muestrear, sobre todo en zonas del humedal, realizando muestreos hidroquímicos e isotópicos en diferentes estaciones. Esto permitirá desarrollar un modelo hidrogeoquímico y por ende seguir complejizando el conocimiento del modelo conceptual de interacción de agua subterránea y humedales.

También se visualiza la necesidad de desarrollar un modelo numérico de flujo que permita reunir toda la información existente en la zona de estudio y que actúe como herramienta para profundizar en el modelo conceptual de la zona. Por último, el desarrollo de un modelo numérico de flujo constituirá una valiosa herramienta para los gestores con injerencia en el PNEF.

9 Bibliografía

Alpha Geo Science. http://www.alpha-geo.com/images/stories/docs/terraTEM_Brochure_v4_11.pdf. Consultado 5/5/2019.

Anderson, M. P., & Woessner, W. W. (1992). The role of the postaudit in model validation. *Advances in Water Resources*, 15(3), 167-173.

Astier, J. (1975) Geofísica aplicada a la Hidrogeología. Paraninfo. 344 p.

Bonjour, M. (2013). Heterogeneidades hidrogeológicas de la Cuenca Inferior del Río Uruguay.

Bossi, J., Campal Gennari, N., Ferrando, L. A., Gancio, F., Montaña, J. R., Morales, H. L., & Sprechmann Heidenreich, P. W. (1998). Carta geológica del Uruguay: a escala 1/500.000 (No. 55 (899) CAR).

Carrión, I. A. D., & Larios, E. E. D. J. S. Servicios ecosistémicos.

Chebataroff, J. (1980). La vegetación de algarrobal, monte espinoso del litoral, I. Divisiones de la Provincia Fitogeográfica Uruguayense. *Jornadas de Ciencias Naturales*, (I, 1980, Montevideo). Resúmenes. Montevideo, 77-78.

Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrology* Lewis Publishers. Boca Raton, New York.

Clarkson, B. R., Ausseil, A. G. E., & Gerbeaux, P. (2013). *Wetland ecosystem services. Ecosystem services in New Zealand: conditions and trends*. Manaaki Whenua Press, Lincoln, 192-202.

Corbo, F., Oleaga, A., de los Santos, J. (2014). Elaboración de un modelo conceptual del acuífero Mercedes, Uruguay, basado en prospección geofísica. IPGH, IMFIA, Facultad de Ingeniería, UdelaR.

Dapeña, C., & Panarello, H. O. (2007). Composición isotópica de la precipitación de la Estación Santa Fe. Red Nacional de Colectores. Argentina. In V Congreso Argentino de Hidrogeología (pp. 187-198).

De los Santos., et al. (2020). Avances en el conocimiento del sistema acuífero del litoral sur (SALS). *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, número especial - Octubre/2020-3, p. 86-92. ISSN: 1676-0999.

Díaz, I., & Achkar, M. (2010). Estimación de superficie de monte nativo en el Litoral Norte de Uruguay mediante la utilización de imágenes satelitales LANDSAT 5TM para los años 2001-2009. Montevideo: Proyecto Monte Nativo.

Ernst, F., Alonso, B., Colazzo, M., Pareja, L., Cesio, V., Pereira, A., Pérez-Parada, A. (2018). Occurrence of pesticide residues in fish from south American rainfed agroecosystems. *Science of the total environment*, 631, 169-179.

Fontes, J. C. (1980). Environmental isotopes in groundwater hydrology. In *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Vol. 1.

Ford, I. (1990). Geological map of Uruguay Esc 1,100,000. El Ombu Sheet N-18; Carta geológica del Uruguay Esc. 1.100. 000. Hoja N-18 El Ombu.

Ford, I., & Gancio, F. (1990). Geological map of Uruguay Esc 1,100,000. Algorta Sheet N-16; Carta geológica del Uruguay Esc. 1.100. 000. Hoja N-16 Algorta.

Ford, I., Montana, J., & Morales, H. (1990). Geological map of Uruguay Esc 1,100,000. Paso del Palmar Sheet N-19; Carta geológica del Uruguay Esc. 1.100. 000. Hoja N-19 Paso del Palmar.

Gancio, F., & Ford, I. (1990). Geological map of Uruguay Esc 1,100,000. Guayabos Sheet N-15; Carta geológica del Uruguay Esc. 1.100. 000. Hoja N-15 Guayabos.

Gazzano, I y M. Achkar. (2014). Transformación territorial: análisis del proceso de intensificación agraria en la cuenca del área protegida Esteros de Farrapos, Uruguay. Revista Brasileira de Agroecología 9(2): 30- 43.

Geomative. <https://www.geomative.com/products/resistivity-and-ip/>. Consultado 2/6/2019

Gilfedder, B. S., Frei, S., Hofmann, H., & Cartwright, I. (2015). Groundwater discharge to wetlands driven by storm and flood events: Quantification using continuous Radon-222 and electrical conductivity measurements and dynamic mass-balance modelling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 165, 161-177.

Greeson, P. E., J. R. Clark, and J. E. Clark, (1979). *Wetland Functions and Values: The State of Our Understanding*. American Water Resources Association, Minneapolis, Minnesota, 674 pp.

IDE. https://visualizador.ide.uy/ideuy/core/load_public_project/ideuy/. Consultado 10/3/2020.

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

INUMET [1]. <https://www.inumet.gub.uy/clima/recursos-hidricos/mapa-de-estaciones>. Consultado 5/6/2019

INUMET [2] <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>. Consultado 5/6/2019

Jalali, M. (2005). Major ion chemistry of groundwaters in the Bahar area, Hamadan, western Iran. *Environmental Geology*, 47(6), 763-772.

Kakuru, W., Turyahabwe, N., & Mugisha, J. (2013). Total economic value of wetlands products and services in Uganda. *The Scientific World Journal*, 2013.

Li, P., Qian, H., Wu, J., Zhang, Y., & Zhang, H. (2013). Major ion chemistry of shallow groundwater in the Dongsheng Coalfield, Ordos Basin, China. *Mine Water and the Environment*, 32(3), 195-206.

Liu, Y. (2014). 'Dynamic evaluation on ecosystem service values of urban rivers and lakes: A case study of Nanchang City, China', *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 17, pp. 161–170.

Loke, M.H. (2004) Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

López, A. et al., (2018) Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D y 3D).

Mañay, N., Pistón, M., Cáceres, M., Pizzorno, P., & Bühl, V. (2019). An overview of environmental arsenic issues and exposure risks in Uruguay. *Science of the total Environment*, 686, 590-598.

Martínez, D. E., Bocanegra, E. M., & Manzano Arellano, M. (2000). La modelación hidrogeoquímica como herramienta en los estudios hidrogeológicos.

Mazor, E. (1997). *Chemical and isotopic groundwater hydrology: the applied approach* (No. Ed. 2). Marcel Dekker Inc.

McNeill, J. D. (1994) Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding.

McNeil, J.D., (1994). Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding. Geonics Ltd. Technical note TN 27.

MGAP (2018). Mapa integrado de cobertura/uso del suelo del Uruguay. Año 2018. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/mapa-integrado-coberturauso-del-suelo-del-uruguay-ano-2018>. Consultado 23/3/2020

MGAP, DGRN (2017) Carta de Reconocimiento Detallado de Suelos del Uruguay a escala 1:40.000. <http://web.renare.gub.uy/js/visores/cartasuelos/>. Consultado 2/6/2019.

Millenial Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: wetlands and water*. World Resources Institute.

Mockus, V. (1972). Hydrologic soil groups /Chapler 7) In: *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. NEH Notice 4-102. USDA.

Molfino, J. H., & Califra, A. (2001). Agua disponible de las tierras del Uruguay. Segunda aproximación. División Suelos y Aguas. Dirección General de Recursos Naturales Renovables Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca: Available online at: <http://www.google.com.uy/url>.

Montana, J., Ford, I., & Morales, H. Geological map of Uruguay Esc 1,100,000. Bequeló Sheet N0-20.

Morales, H., Ford, I., & Montana, J. Geological map of Uruguay Esc 1,100,000. Cololo Sheet 0-19.

Mueller, M. H., Alaoui, A., & Alewell, C. (2016). Water and solute dynamics during rainfall events in headwater catchments in the Central Swiss Alps under the influence of green alder shrubs and wetland soils. *Ecohydrology*, 9(6), 950-963.

MVOTMA 2018, Primera década del SNAP (Sistema Nacional de Áreas Protegidas). http://www.mvotma.gub.uy/component/k2/item/download/10344_e6d35a1c68fd05c5f080bc95fa2c7208. Consultado 1/2/2020

Orellana, E, (1972). *Prospección geoeléctrica en corriente continua*, Paraninfo, Madrid, ISBN: 84-283-1153-6.

Preciozzi, F., Spoturno, J. (1974). *Geología de las hojas Arroyo Negro, San Javier*, escala 1:50.000. Inédito.

Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W., & Rossi, P. (1985). Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a la escala 1: 500.000. DINAMIGE, Montevideo, 91.

Pritchard, D. (2010). Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4ª edición: Manual 2 Políticas Nacionales de Humedales Elaboración y aplicación de Políticas Nacionales de Humedales.

Ramos, J.A, (2016). Tesis de master en geofísica aplicada: “Caracterización geólogo-geofísica de un sector del sistema Acuífero Salto-Arapey mediante el empleo del sondeo audiomagnetotelérfico y técnicas geomáticas.” Cujae, La Habana, Cuba, 2016.

Ramsar (2009b). Factsheet 3: Shoreline stabilisation and storm protection. Gland, Switzerland, Ramsar Convention Secretariat.

Reynolds, J. M. (1997). An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons.

Schot, P. & Winter, T. (2006). (eds.). Groundwater-surface water interactions in wetlands for integrated water resources management. *Journal of Hydrology*, 320 (3-4), 261-520.

Silveira, L., Gamazo, P., Alonso, J., y Martínez, L. (2016). Effects of afforestation on groundwater recharge and water budgets in the western region of Uruguay. *Hydrological Processes*, 30(20), 3596-3608.

Sosa, B., Romero, D., Fernández, G., & Achkar, M. (2018). Spatial analysis to identify invasion colonization strategies and management priorities in riparian ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 411, 195-202.

UNIT, Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2010. Uruguayan drinking water standard 833:2008. http://www.ose.com.uy/descargas/Clientes/Reglamentos/unit_833_2008_.pdf

Van Klink, R., Nolte, S., Mandema, F. S., Lagendijk, D. G., WallisDeVries, M. F., Bakker, J. P., & Smit, C. (2016). Effects of grazing management on biodiversity across trophic levels—The importance of livestock species and stocking density in salt marshes. *Agriculture, ecosystems & environment*, 235, 329-339.

Winter, T. C. (1999). Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 7(1), 28-45.

Zheng, B. et al., (2008). ‘Assessment of ecosystem services of Lugu Lake watershed’, *The International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 15, pp. 62–70.

Zuñiga, R, (2011). Detección de zonas de riesgo en la ciudad de Guatemala, Tesis de Ingeniería Geofísica, UNAM, México.

10 Anexo

10.1 Información de base

10.1.1 Climatología

Las estaciones meteorológicas pertenecientes al Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) más cercanas se encuentran en las ciudades de Young, Paysandú y Mercedes. En la Figura 10-1 se muestran las estaciones meteorológicas citadas y las estaciones pluviométricas en la zona. En la Tabla 10 y Tabla 11 se indica el nombre de la estación y su ubicación.

En la zona de estudio, según datos de INUMET, la precipitación anual promedio calculada para el período de 1/2000-6/2019 es de 1015 mm/año, con una desviación estándar de 390 mm/año, un máximo de 2118 mm/año y un mínimo de 652 mm/año.

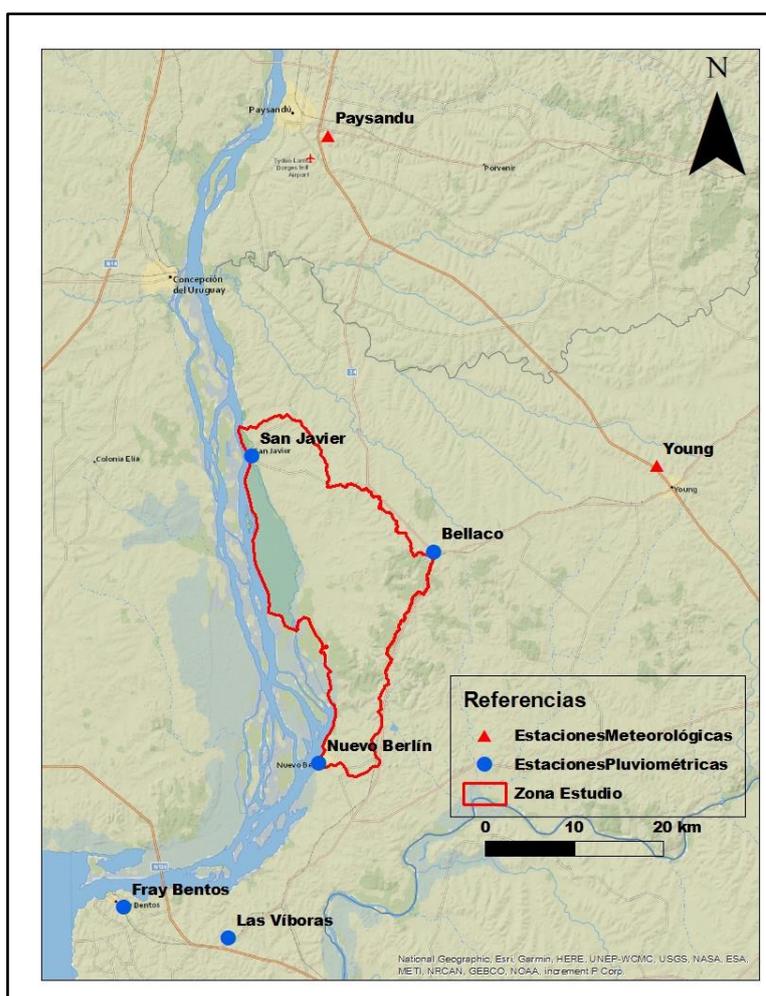


Figura 10-1: Estaciones Meteorológicas INUMET.

Tabla 10: Estaciones Meteorológicas. Coordenadas UTM 21S.

Nombre	X_UTM	Y_UTM
Mercedes	400512	6320489
Paysandú	402128	6421401
Young	439061	6384000

Tabla 11: Estaciones Pluviométricas. Coordenadas UTM 21S.

Nombre	X_UTM	Y_UTM
San Javier	393480	6385058
Bellaco	413924	6374169
Nuevo Berlín	401050	6350211
Fray Bentos	379103	6333886
Las Víboras	390898	6330366

10.1.2 Hidrología Superficial

El área donde subyace el PNEF tiene una importante red hidrográfica con cursos de diferente orden. El PNEF se encuentra limitado al oeste por el Río Uruguay. Los cursos de menor orden tienen dirección este-oeste siendo afluentes del Río Uruguay y teniendo parte de su recorrido dentro del parque. El curso más importante es el arroyo Román Grande. Ninguno de estos afluentes del Río Uruguay tiene estaciones de aforo.

En función de la información consultada en IDE (Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay) de donde se descargó el Modelo Digital del Terreno con celdas de 2.5 m x 2.5 m y una precisión de 0.1 m, se trazaron las principales cuencas superficiales que se encuentran dentro de la zona de estudio. En la Figura 10-2 se muestra la red de drenaje existente en la zona de estudio.

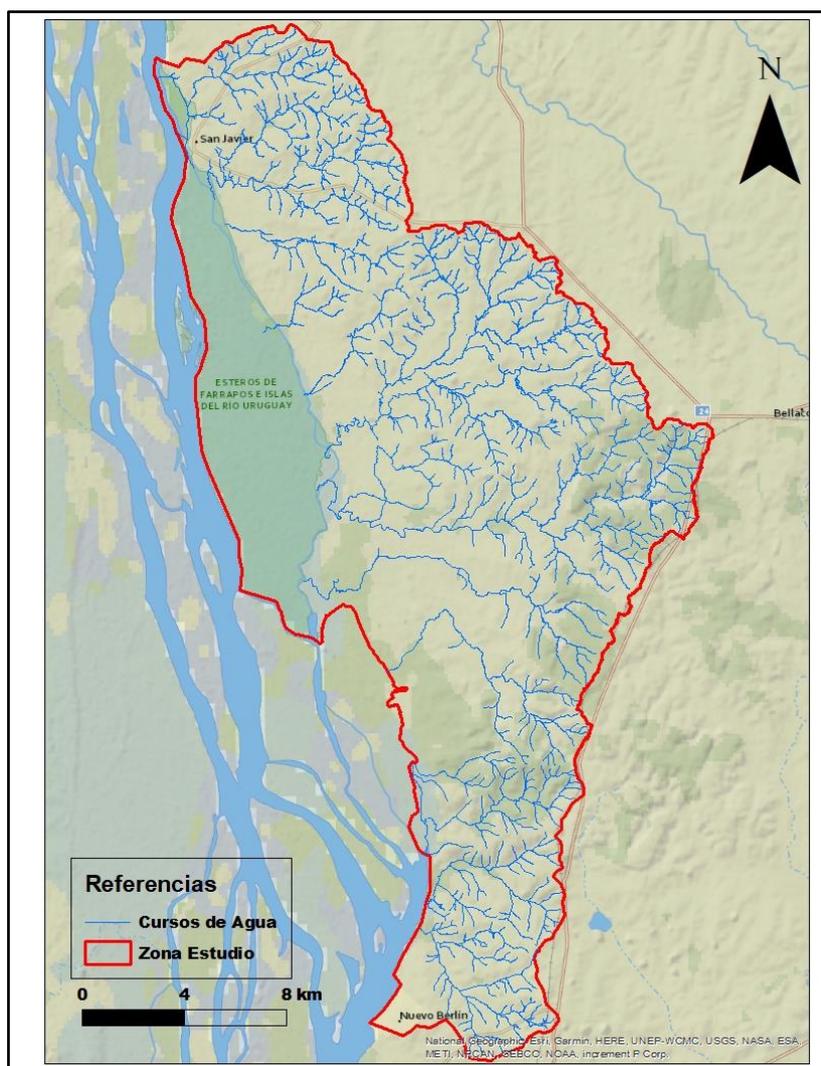


Figura 10-2: Red de drenaje de la zona de estudio. Fuente IDE.

A partir de la información mencionada anteriormente se trazaron 12 cuencas hidrológicas. En la Figura 10-3 se muestran las cuencas y su respectivo cauce principal. En la Tabla 12 se detallan las principales características de las mismas.



Figura 10-3: Cuencas hidrológicas y cursos de agua principales en la zona de estudio.

Tabla 12: Parámetros de las cuencas hidrológicas en la zona de estudio

Nombre	Área (Km ²)	Perímetro (Km)	Pendiente Media Cuenca (%)	Desnivel Máximo (m)	L cauce (km)	Pendiente Media Cauce por extremos (%)	Tc (hs)
Cuenca1	19.9	24.6	2.56	37.3	9.9	0.38	3.4
Cuenca2	34.9	28.4	2.6	37.1	11.9	0.31	4.2
Cuenca3	14.8	22.0	2.2	41.7	9.3	0.45	3.0
Cuenca4	8.9	12.9	2.1	28.2	4.3	0.65	1.5
Cuenca5	11.7	19.1	1.9	39.0	7.9	0.49	2.6
Cuenca6	73.4	48.3	2.8	51.7	16.0	0.32	5.2
Cuenca7	66.1	51.1	2.7	62.6	22.2	0.28	7.1
Cuenca8	32.3	37.5	1.8	52.8	17.0	0.31	5.5
Cuenca9	39.8	33.6	2.3	47.0	13.4	0.35	4.4
Cuenca10	21.2	21.4	3.5	54.4	10.0	0.54	3.0
Cuenca11	17.7	19.3	3.9	44.7	8.5	0.53	2.6
Cuenca12	25.7	22.7	3.5	45.7	7.9	0.58	2.4

10.1.3 Suelos

10.1.3.1 Uso de Suelos

En la zona de estudio los usos de suelos para producción más importantes son la forestación y la agricultura bajo diferentes manejos. El uso de suelo de pastizal también cubre un área importante de la zona. En la Figura 10-4 se muestran los usos de suelos escala 1:50.000 realizado por el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP, 2018).

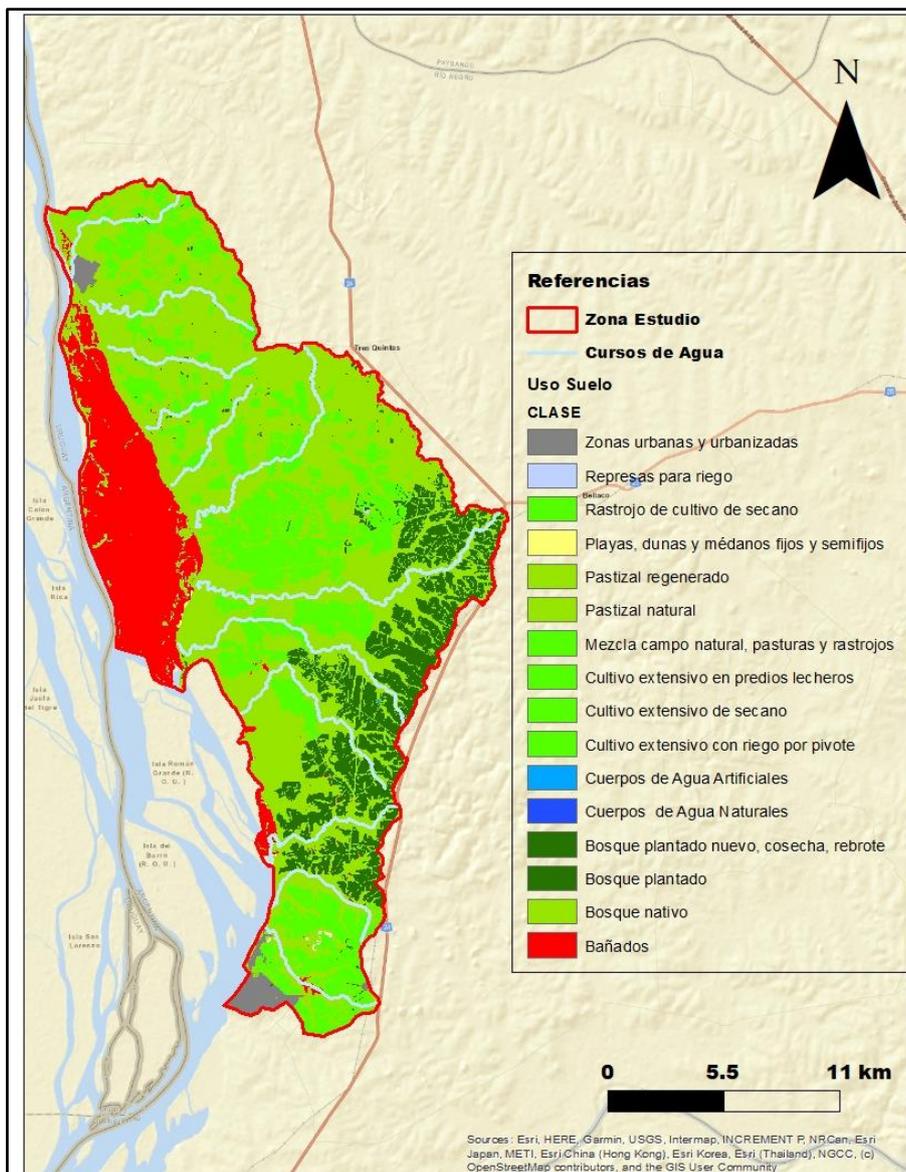


Figura 10-4: Usos de suelo de la zona de estudio. Fuente MGAP (2018).

10.1.3.2 Tipo de Suelos

En el área de estudio se encuentran tres tipos de suelos principales según la Carta de Reconocimiento de suelos del MGAP Escala 1:40000 (MGAP, 2017). Ellos son Llanuras, Tierras Ondulantes Fuertes (Pendientes >6%) y Tierras Ondulantes Suaves (Pendientes <6%). En la Figura 10-5 se muestran los suelos existentes en el área de estudio. Las unidades según su clasificación son:

- **BñF1** (Bañados): Fluvisoles. Asociados a Gleysoles Lúvicos

- **Bq4.1** (Tierras onduladas suaves): Dominan Brunosoles Éútricos Típicos areno arcillosos profundos.
- **FB1** (Tierras onduladas fuertes, Fray Bentos): Brunosoles Éútricos Háplicos y Típicos limo arcillosos y francos profundos. Asociados suelos alcalinos
- **TB1** (Tierras onduladas suaves): Dominan Luvisoles Ócricos arenosos, profundos asociados a Argisoles Dístricos arenosos.
- **TB1.2** (Tierras onduladas suaves): Brunosoles Subéútricos Lúvicos francos, profundos.
- **TB2.2** (Tierras onduladas suaves): Brunosoles Subéútricos Lúvicos Francos, profundos y Argisoles Dístricos arenosos.
- **VS3** (Llanuras, vías de drenaje): Brunosoles Éútricos Típicos y Lúvicos limo arcillosos y Planosoles Éútricos Melánicos limo arcillosos
- **VS4.1** (Llanuras, Terrazas altas): Dominan Brunosoles Éútricos Típicos y Lúvicos limo arcillosos y Planosoles Éútricos Melánicos limo arcillosos

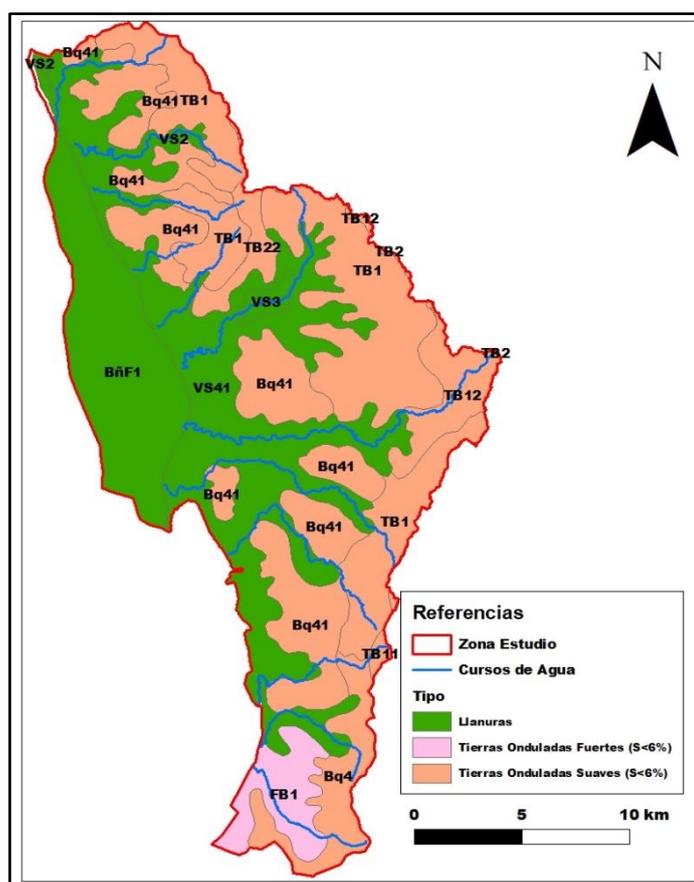


Figura 10-5: Unidades de Suelos en el área de estudio según MGAP (2017).

Molfino y Califra (2001) determinan el Agua Potencialmente Disponible Neta en mm (APDN) para cada Unidad Cartográfica de Suelos (escala 1:1.000.000) presente en el territorio nacional.

Las unidades cartográficas de suelos presentes en la zona de estudio del presente trabajo son las siguientes (Figura 10-6):

- Unidad Cartográfica de Suelos Tres Bocas (TB): APDN 110,8 mm
- Unidad Cartográfica de Suelos Fray Bentos (FB): APDN 115,4 mm

- Unidad Cartográfica de Suelos Bequeló (Bq): APDN 138,2 mm
- Unidad Cartográfica de Suelos Villa Soriano (VS): APDN 173,3 mm
- Unidad Cartográfica de Suelos Bañado de Farrapos (BñF): APDN 178,7 mm

La clasificación de los suelos en grupos hidrológico (GH) se utiliza en la determinación de complejos suelo-cobertura empleados en el método del Natural Resources Conservation Service de EE.UU. (NRCS) para la estimación del escurrimiento a partir de la precipitación. Los GH constituyen así un insumo fundamental para estudios hidrológicos básicos y aplicados en que intervienen parámetros como lluvia y escurrimiento.

Varias propiedades del suelo influyen decisivamente en el proceso de generación de escurrimiento: textura, estructura y espesor de los horizontes del perfil, volumen de poros no capilares, cambio de volumen del suelo en función del contenido de humedad, mineralogía de la fracción arcilla y altura del nivel freático.

La clasificación en GH del NRCS agrupa los suelos en cuatro clases denominadas A, B, C y D, y en tres clases duales A/D, B/D Y C/D, conforme a los criterios indicados arriba. Las definiciones de las cuatro clases básicas conforme a Mockus (1972) son las siguientes:

Grupo A. (Bajo potencial de escurrimiento). Suelos con velocidad de infiltración relativamente alta cuando están completamente mojados y que consisten principalmente de arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos poseen una alta velocidad de transmisión del agua.

Grupo B. Suelos con velocidad de infiltración moderada cuando están completamente mojados. Estos suelos son principalmente profundos a moderadamente profundos, de drenaje moderadamente bueno a bueno y de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos poseen una velocidad de transmisión del agua moderada.

Grupo C. Suelos con velocidad de infiltración lenta cuando están completamente mojados. Estos suelos tienen generalmente una capa que impide el movimiento descendente del agua o son suelos de texturas moderadamente finas a finas. Estos suelos poseen una velocidad de transmisión del agua lenta.

Grupo D. (Alto potencial de escurrimiento). Suelos con velocidad de infiltración muy lenta cuando están completamente mojados. Son generalmente arcillas con alto potencial de expansión, suelos con un nivel freático alto permanente, suelos con una capa de arcilla en o cerca de la superficie o suelos superficiales sobre material casi impermeable. Estos suelos poseen una velocidad de transmisión del agua muy lenta.

Los GH duales, A/B, B/D Y C/D, se asignan a suelos muy húmedos que pueden drenarse adecuadamente. La primera letra se aplica a la situación drenada y la segunda a la anterior al drenaje (régimen hídrico natural del suelo). Solamente se incluyen en alguna de las clases duales a los suelos calificados como D en su condición natural y cuando su drenaje es factible y práctico de llevar a cabo.

En la zona de estudio se encuentra el registro de suelos con clasificación según Grupo Hidrológico C y D, correspondiendo este último a la zona del humedal (Figura 10-7).

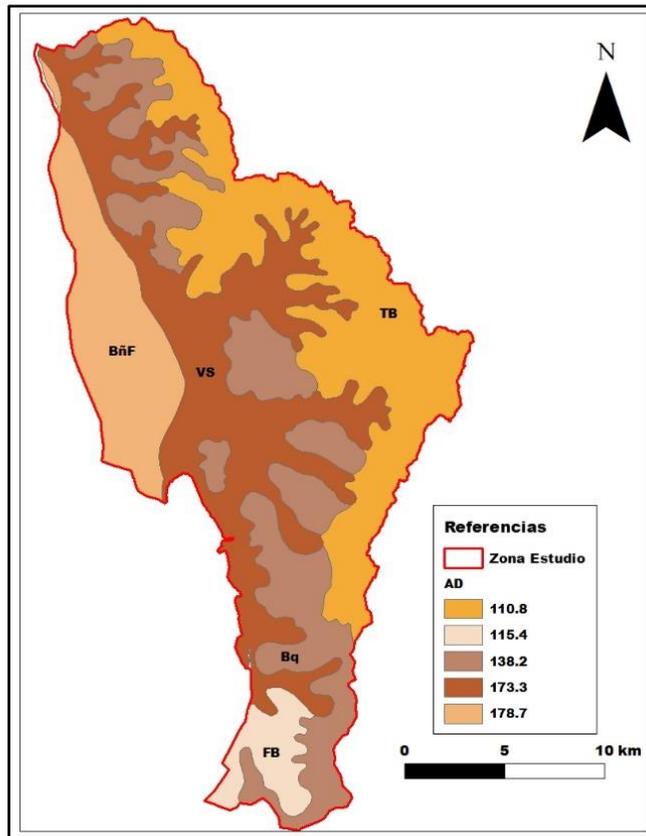


Figura 10-6: Clasificación de suelos según agua disponible. Molfino y Califra (2001).

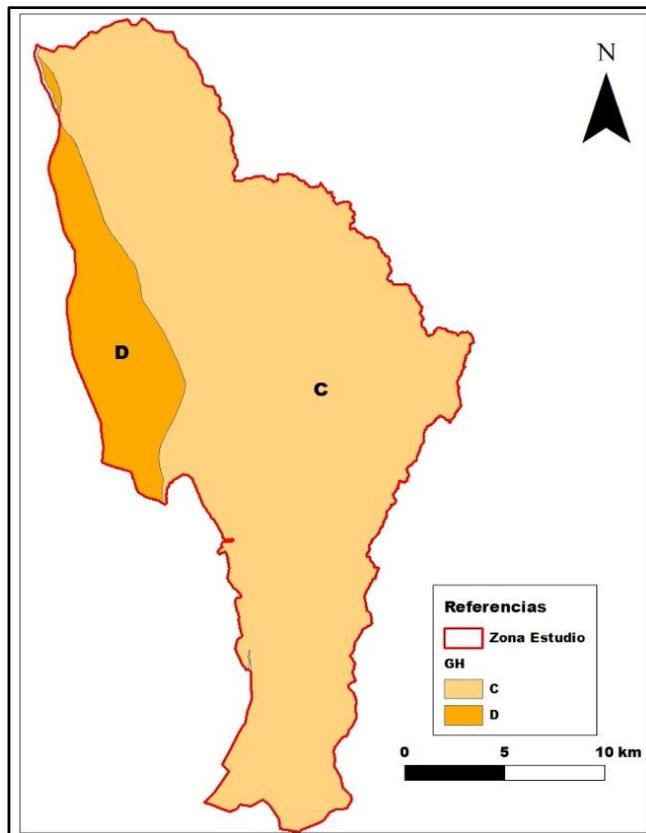


Figura 10-7: Clasificación de suelos según grupo hidrológico. Molfino y Califra (2001).

10.2 Geofísica

10.2.1 Fundamento teórico de técnicas geofísicas utilizadas

10.2.1.1 Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)

Existen diversas formas de explorar geoelectricamente el subsuelo, siendo las de mayor resolución las denominadas técnicas ERT. Es una técnica de carácter no destructivo. Se destaca respecto a otras técnicas geofísicas de prospección somera (Sondeo Eléctrico Verticales (SEV), TDEM, MT, entre otras) dado que permite obtener información en detalle en dos y tres dimensiones.

Según Reynolds, (1997), el material de un cubo de lado L (tendrá una resistencia al pasaje de una corriente (I) y generará una caída de potencial (V) entre ambas caras (Figura 10-8). La resistencia es proporcional al largo L e inversamente proporcional al área transversal (A). Esta relación se muestra en la siguiente ecuación y a la constante de proporcionalidad ρ se le denomina resistividad.

$$R = \frac{\rho L}{A} (\Omega)$$

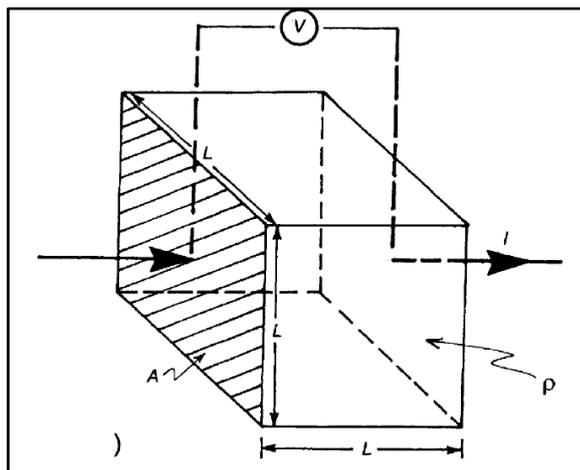


Figura 10-8: Cubo de lado L donde se inyecta una corriente I y se genera una diferencia de potencial V. (Reynolds, 1997).

Por otro lado, para un circuito eléctrico, a partir de la Ley de Ohm se puede establecer que la resistencia es proporcional al voltaje medido y a la corriente inyectada a través de la expresión:

$$R = \frac{V}{I} (\Omega)$$

Por lo tanto, combinando las dos expresiones anteriores, la resistividad de un material se puede expresar como:

$$\rho = \frac{VA}{IL} \left(\frac{\Omega}{m}\right)$$

En la Figura 10-9 se muestran los elementos necesarios para realizar una medición ERT en campo.

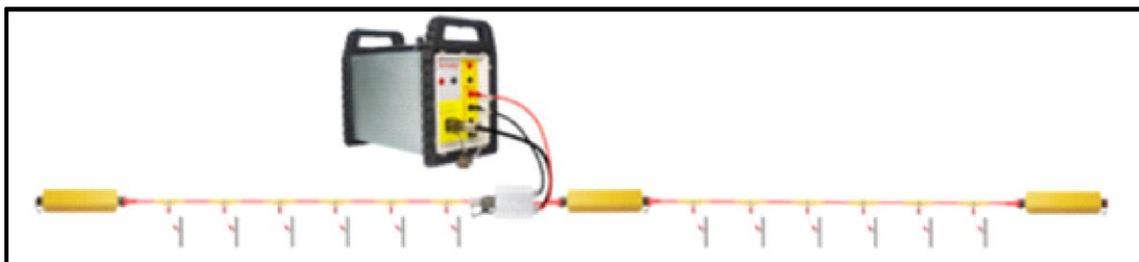


Figura 10-9: Adquisidor de datos, cables multinúcleo y electrodos para ERT. Fuente Geomative

Un arreglo electrodico es una disposición geométrica formada por dos pares de electrodos, dos emisores y dos receptores. A través de los electrodos emisores C1-C2 se inyecta corriente continua al terreno midiendo su intensidad con un miliamperímetro en serie. Simultáneamente, se mide la diferencia de potencial entre los electrodos P1-P2 con un milivoltímetro. Los datos son almacenados en la unidad central.

Cuando se tiene un arreglo tetraelectrodico como se observa en la Figura 10-10, el cálculo del potencial P en un punto dado es la suma algebraica de los potenciales de ambos electrodos A y B y en los electrodos M y N los potenciales son:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] \quad V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right]$$

Calculando la diferencia de potencial y reordenando los términos, se puede obtener la expresión de la resistividad:

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V_{MN}}{I} \left\{ \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\}^{-1}$$

Para el arreglo mostrado en la Figura 10-10, el factor geométrico se define como:

$$K = 2\pi \left\{ \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\}^{-1}$$

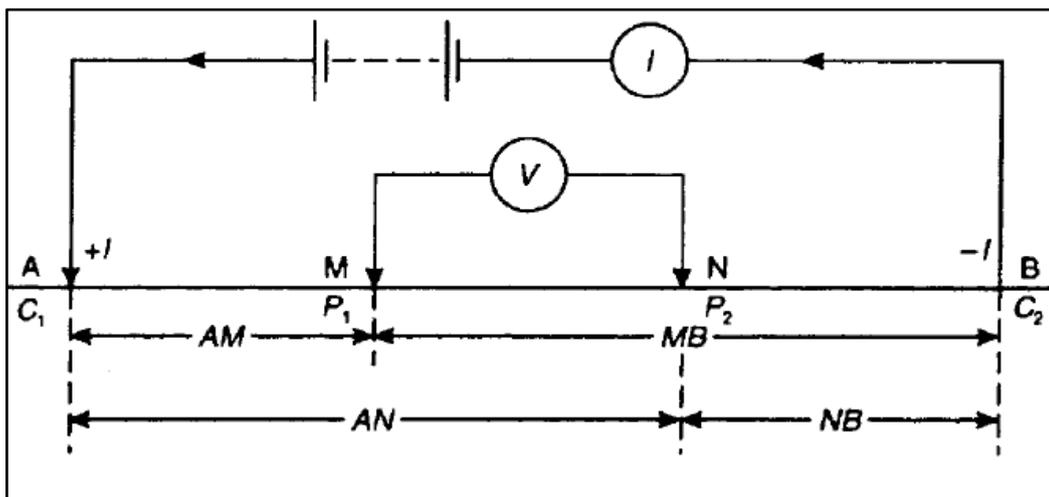


Figura 10-10: Arreglo tetraelectrodico para medición eléctrica. Reynolds, (1997).

Como se mostró anteriormente, los valores de resistividad dependen de la geometría del arreglo a través del factor geométrico K. Cualquier arreglo tetraelectrodico es un arreglo electrodico y puede emplearse para realizar una medición geoelectrica. Sin embargo, los arreglos electrodicos más empleados son:

- Wenner (alpha, beta y gamma)
- Wenner Schlumberger
- Dipolo Dipolo
- Polo Polo
- Polo Dipolo

A continuación, se muestra un esquema básico de las variantes Wenner, Schlumberger y Dipolo Dipolo (Figura 10-11).

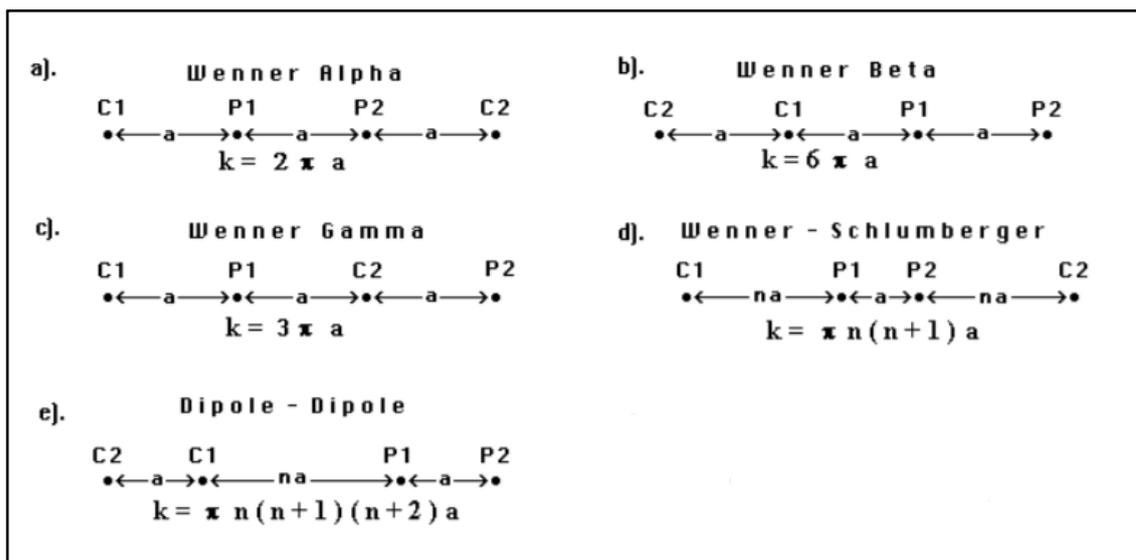


Figura 10-11: a) Wenner Alpha; b) Wenner Beta; c) Wenner Gamma; d) Wenner Schlumberger e) Dipolo-Dipolo. (Loke, 2004)

En la Figura 10-12 se muestra la disposición de los puntos medidos en profundidad utilizando un arreglo Wenner Alpha, y los puntos de medición que se generan. Otro tipo de arreglo variará la geometría del plano de resistividades obtenido.

A modo general, a medida que aumenta la separación entre los electrodos se obtienen nuevos puntos de medición a mayores profundidades y se van conformando las capas $n=1$, $n=2$ y las sucesivas.

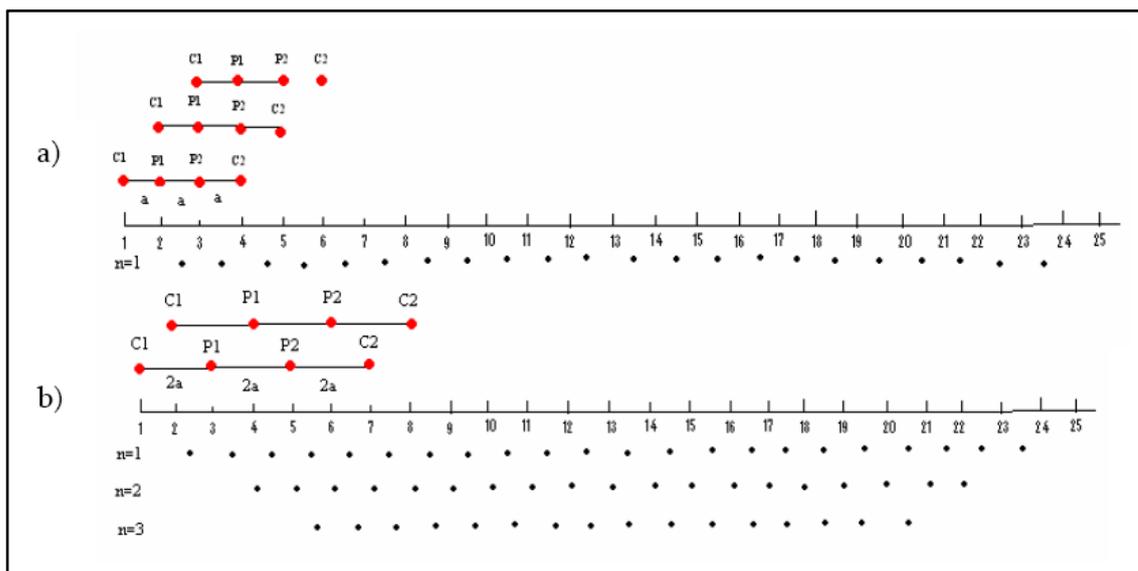


Figura 10-12: Arreglo Wenner Alpha en tomografía geoelectrica. Manual Usuario WDJ-4 BTSK.

Los datos son tratados por medio de algoritmos matemáticos de inversión. La inversión da como resultado una imagen en 2D de resistividades aparentes que se correlaciona con la información geológica, perforaciones, geoquímica, hidrogeología y edafología conocidas. A través de la interpretación se llega a las conclusiones del Diagnóstico Ambiental, que puede ser constatada mediante cateo mecánico.

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:

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

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:

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

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:

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

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, J. R. 1975):

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

Según Orellana (1972), los materiales presentan las siguientes resistividades (Tabla 13).

Tabla 13: Resistividades de diferentes materiales. (Modificada de Orellana, 1972).

Material	Resistividad (ohm.m)
----------	----------------------

	Mínimo	Máximo
Limo	20	100
Arcilla	1	100
Agua dulce	10	300
Areniscas	100	10000

Astier, (1975) hace hincapié en que estos valores pueden variar según el grado de humedad y arcillosidad que presenten.

Según López et al. (2018), la configuración Wenner es adecuada para detectar estructuras horizontales y tiene mayor intensidad en la señal de medición respecto a otros dispositivos debido a su constante geométrica. Esto puede tener incidencia en sitios con mucho ruido de fondo. Un inconveniente que presenta este arreglo es la disminución de la cobertura horizontal al aumentar el espaciamiento entre los electrodos.

El arreglo Dipolo-Dipolo, a diferencia del arreglo Wenner, tiene resolución suficiente para detectar estructuras verticales, pero no así para estructuras horizontales como pueden ser las capas sedimentarias. La profundidad de investigación es menor al arreglo Wenner. Otra desventaja del arreglo es la atenuación de la señal al aumentar el factor “n”.

Los arreglos electrónicos empleados en este proyecto (Wenner alpha, betta, gamma y schlumberger), son de los arreglos más empleados para determinaciones de resistividad según López et al. (2018). Sin embargo, según este autor, la elección del arreglo a emplear dependerá del objetivo perseguido o de las características de la investigación, como puede ser la profundidad de investigación, la sensibilidad del arreglo a los cambios verticales y horizontales de la resistividad subterránea y la cobertura horizontal de datos.

10.2.1.2 Transiente Electromagnético (TDEM)

La magnitud y tasa de decaimiento del campo secundario depende de la conductividad del medio y de la geometría de las capas del subsuelo.

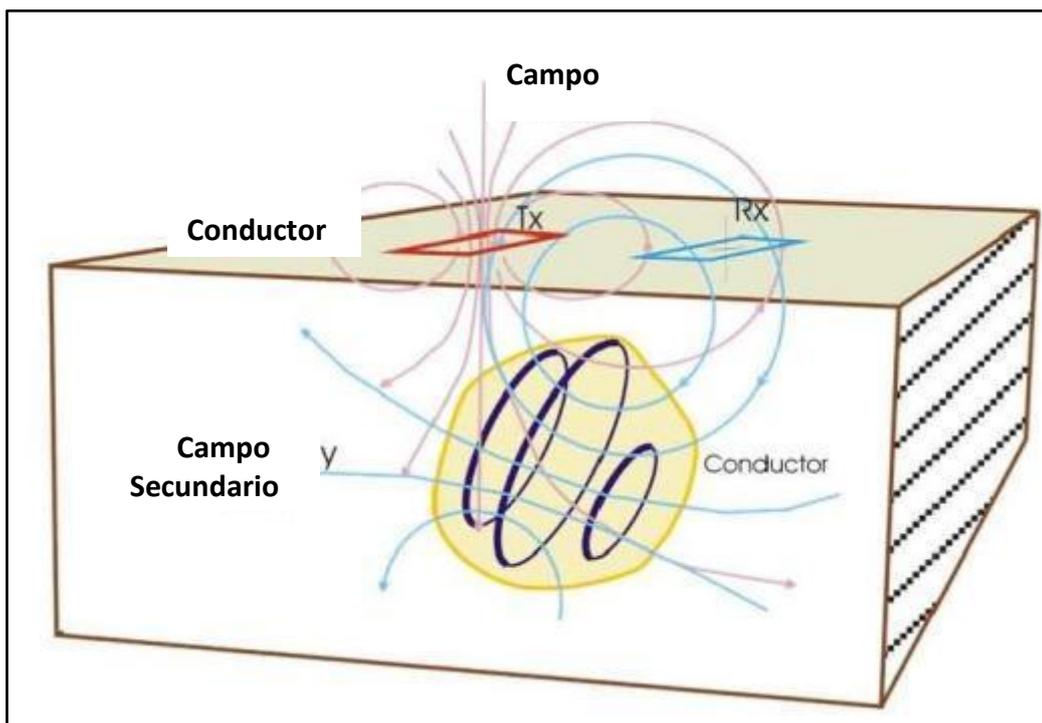


Figura 10-13: Esquema de la metodología TDEM. Extraído de Alpha Geo Science.

La Figura 10-14 muestra una curva típica de respuesta del medio donde el tiempo y el voltaje se expresan en ejes logarítmicos. Puede observarse que la respuesta del medio se puede dividir en tres etapas. Una etapa temprana, donde la respuesta del medio es constante en el tiempo, una etapa intermedia donde la forma de la respuesta del medio varía continuamente con el tiempo, y una etapa tardía donde la respuesta es una línea recta en el gráfico doble logarítmico.

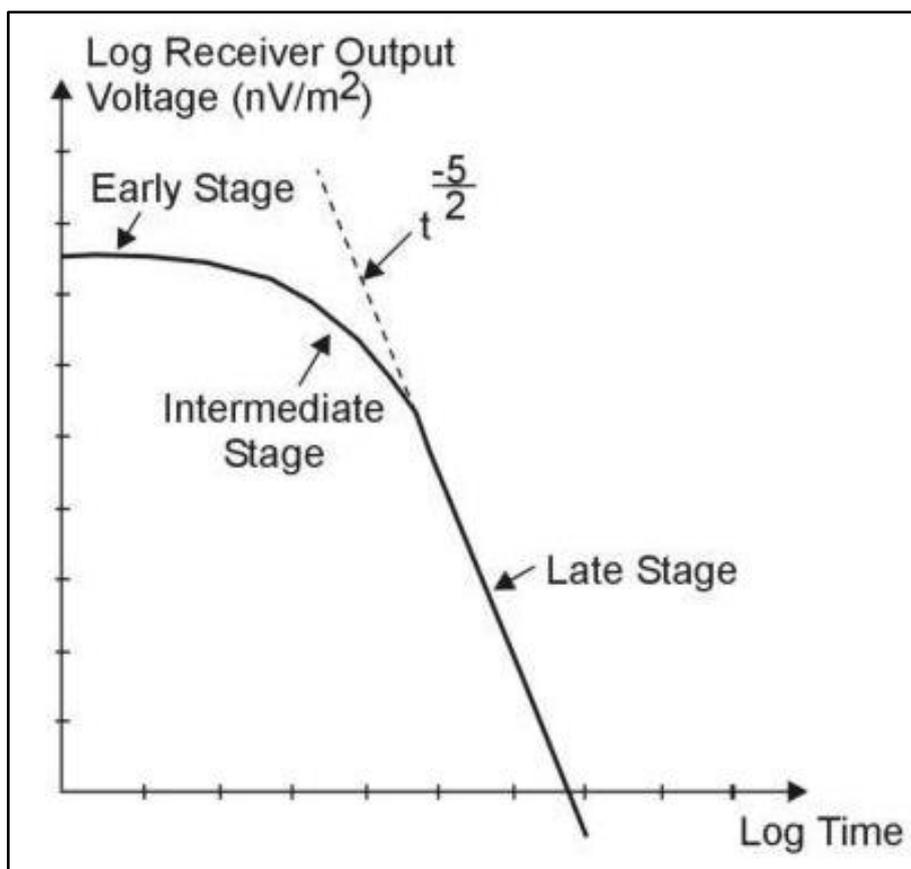


Figura 10-14: Voltaje medido en el receptor en función del tiempo. Ejes en escala doble logarítmica. Tomado de McNeill (1994).

La función de respuesta en el receptor es generalmente una función matemática compleja en función del tiempo y del voltaje. Sin embargo, durante la etapa tardía la función matemática se simplifica considerablemente, y puede demostrarse que, en este intervalo, la respuesta del medio puede expresarse como una función simple que depende del tiempo y de la conductividad del medio según la siguiente ecuación:

$$V(t) = \frac{k_1 M \sigma^{3/2}}{t^{5/2}}$$

Donde:

k_1 es una constante, M es el momento magnético, producto de la corriente del emisor (I_x) por el área del lazo emisor (m^2), σ es la conductividad del terreno (Siemens/m), t es el tiempo (s) y $V(t)$ es el voltaje medido en un loop receptor de área unitaria (m^2).

Dado que la conductividad es el inverso de la resistividad, puede expresarse que:

$$\rho_a(t) = \frac{k_2 M^{2/3}}{V(t)^{2/3} t^{5/3}}$$

10.2.2 Mediciones Geofísicas

10.2.2.1 Sitio 1

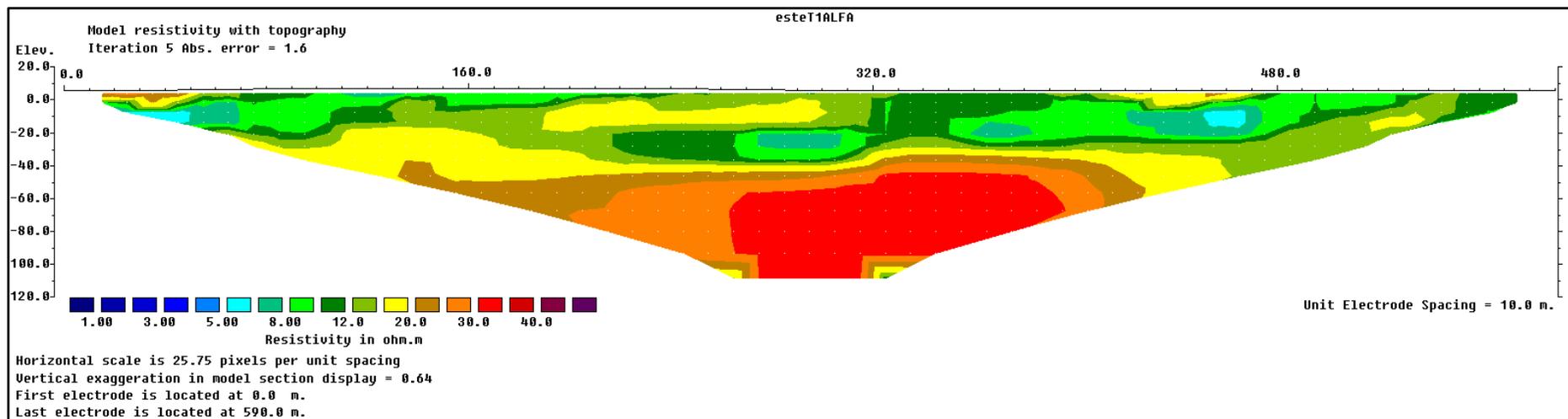


Figura 10-15: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 1 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.

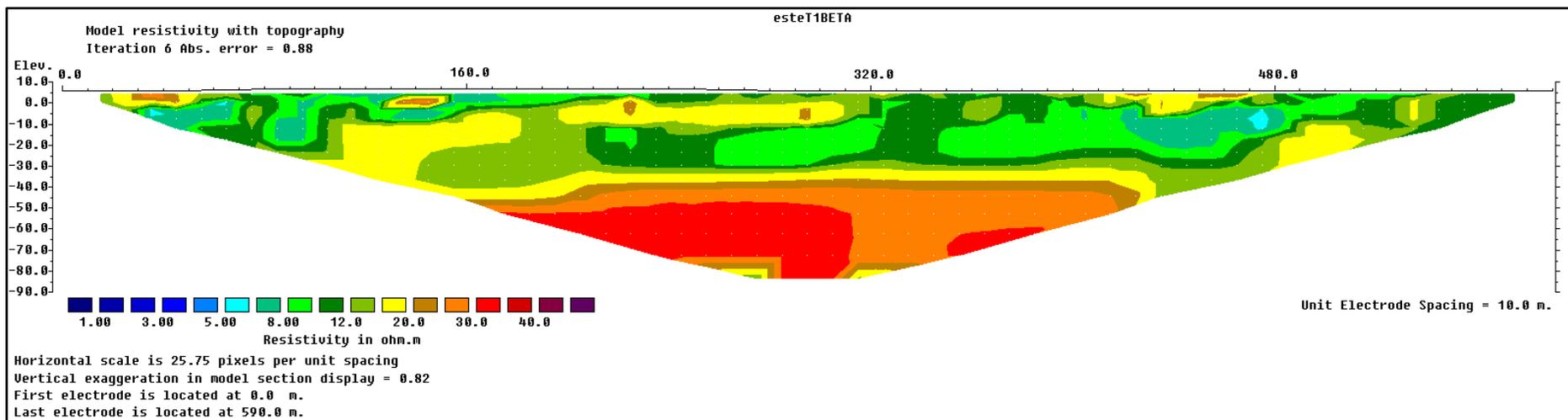


Figura 10-16: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 1 utilizando un dispositivo Wenner Beta.

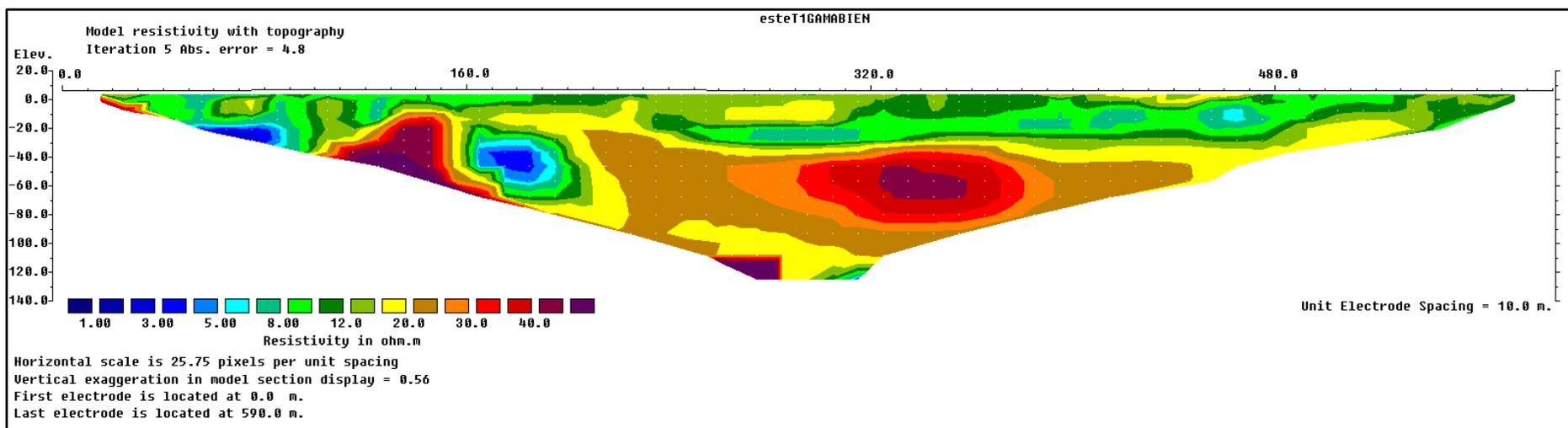


Figura 10-17: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 1 utilizando un dispositivo Wenner Gamma.

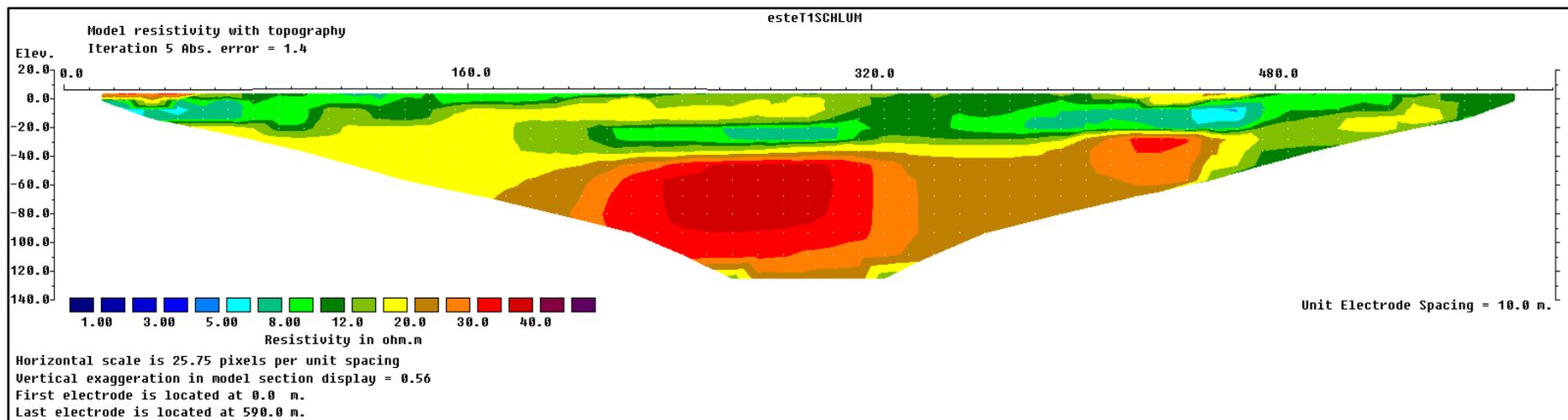


Figura 10-18: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 1 utilizando un dispositivo Wenner Schlumberger.

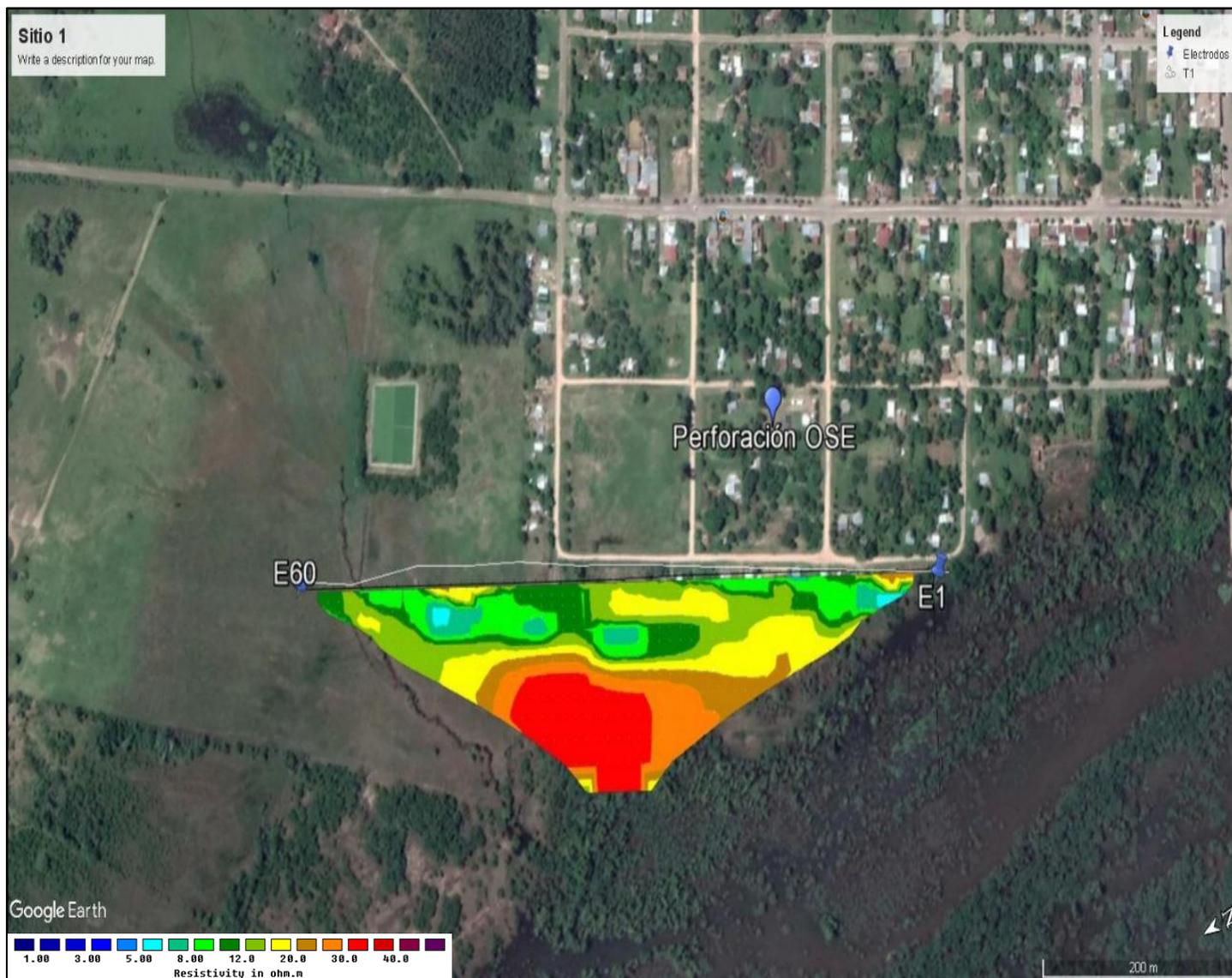


Figura 10-19: Resultado de ERT sitio 1, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 120 m.

10.2.2.2 Sitio 2

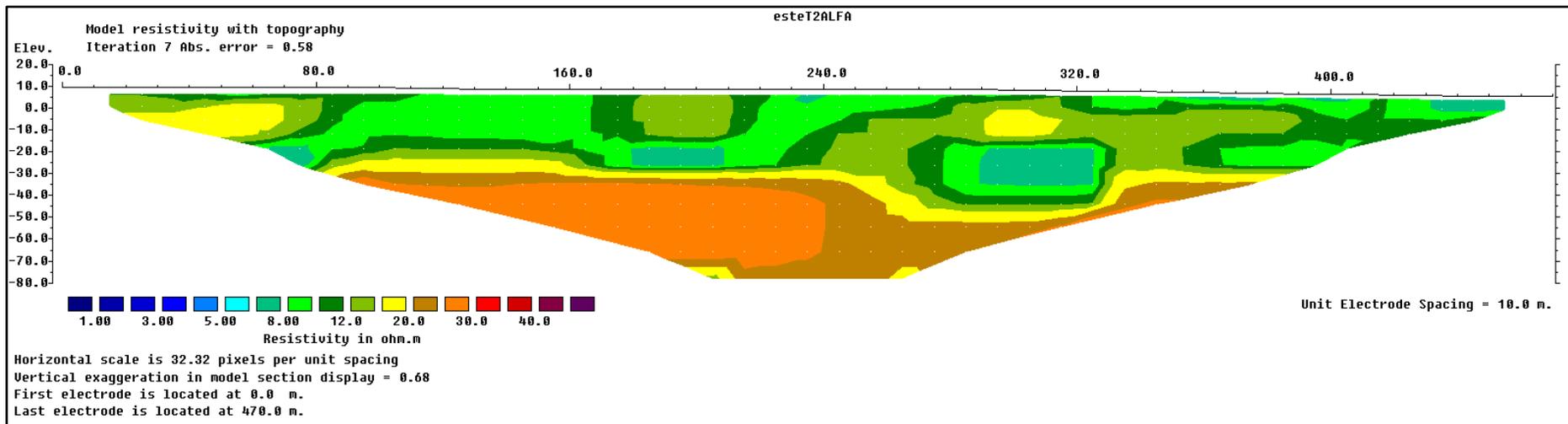


Figura 10-20: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 2 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.

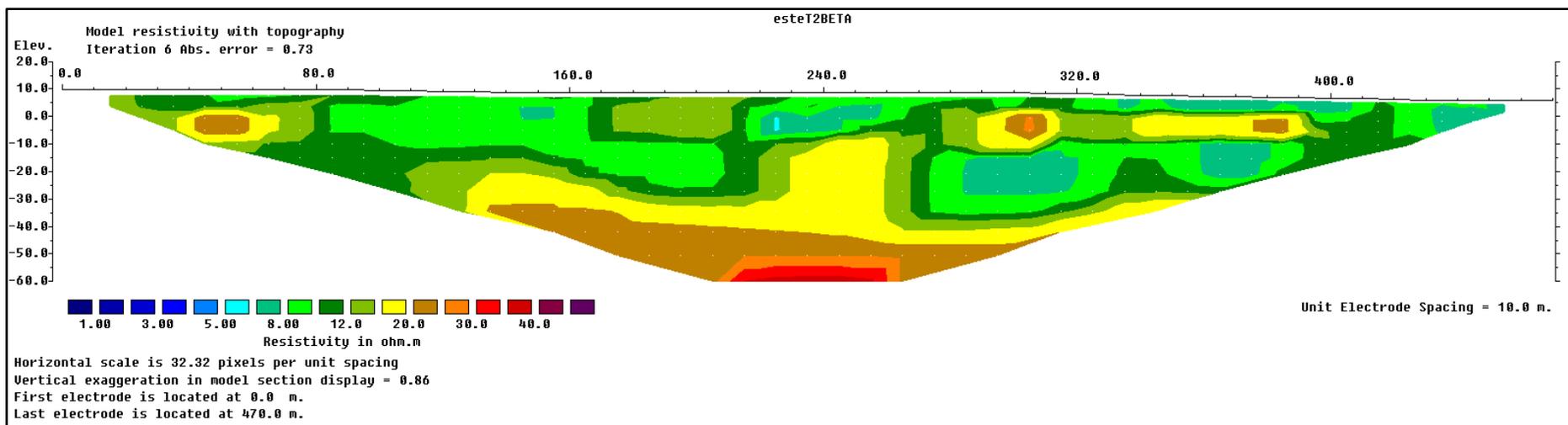


Figura 10-21: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 2 utilizando un dispositivo Wenner Beta.

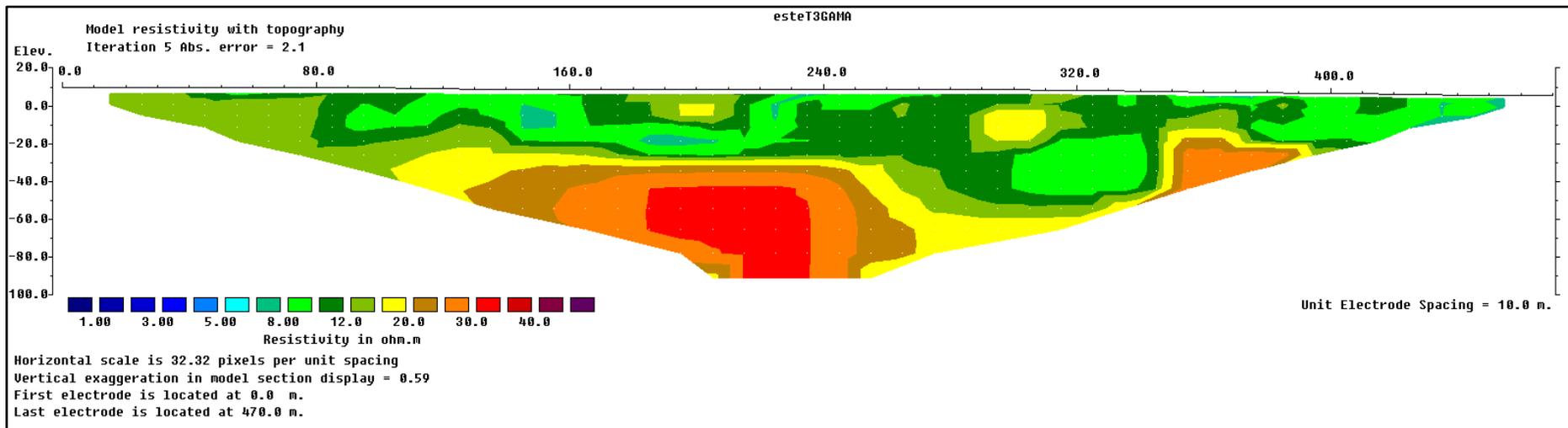


Figura 10-22: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 2 utilizando un dispositivo Wenner Gamma.

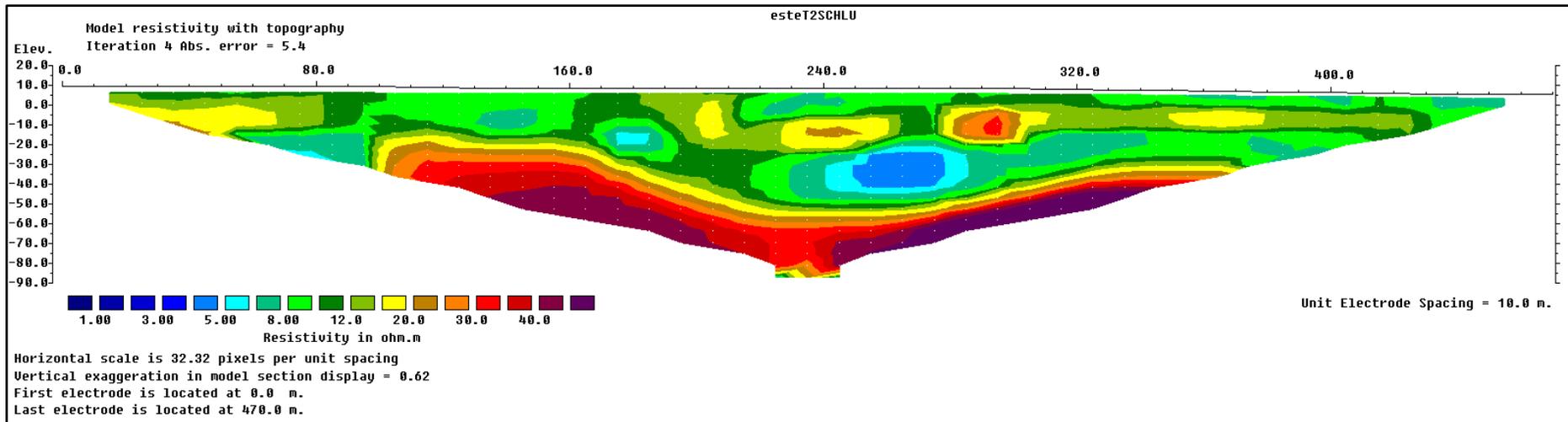


Figura 10-23: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 2 utilizando un dispositivo Wenner Schlumberger.

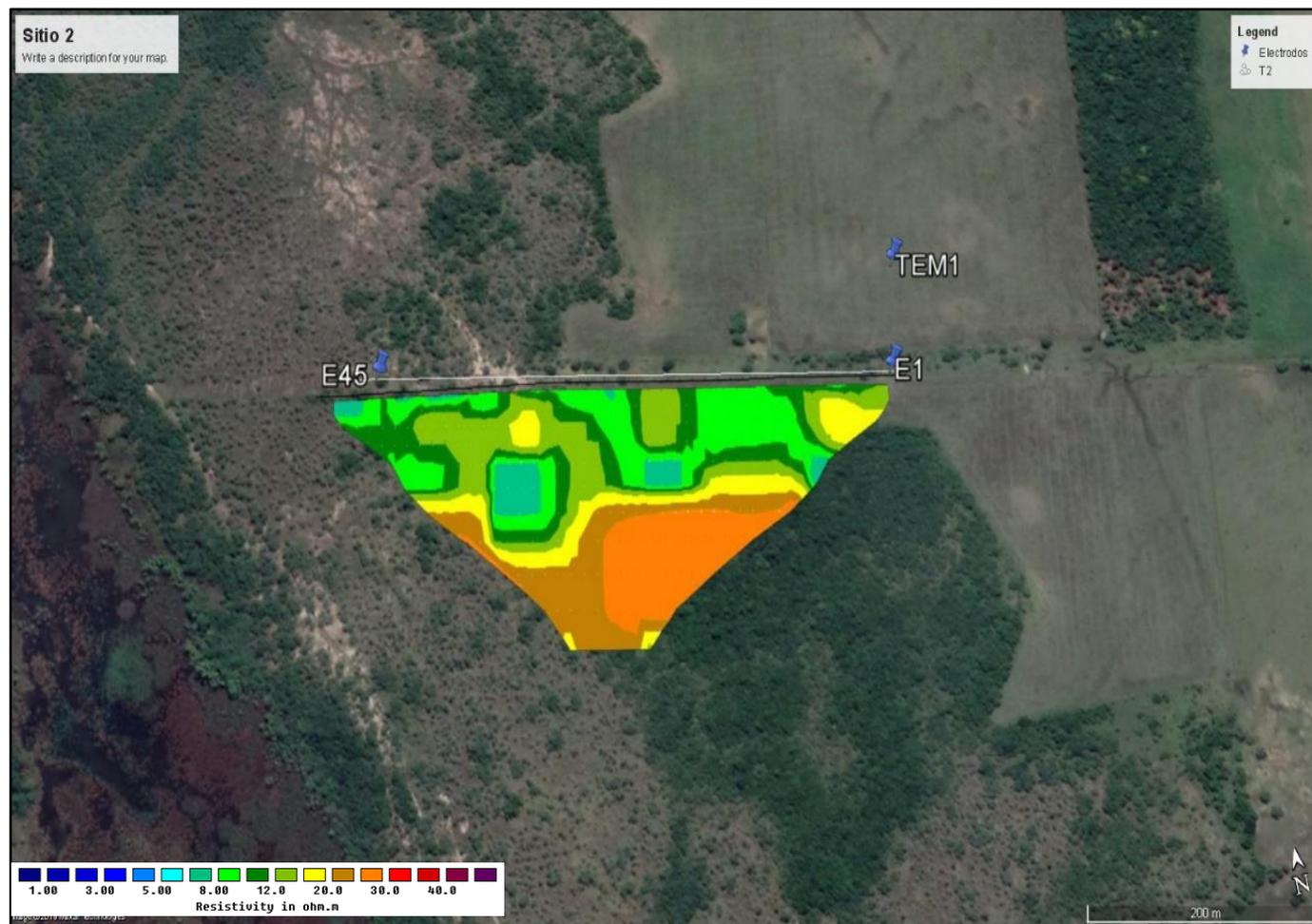


Figura 10-24: Resultado de ERT sitio 2, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 90 m.

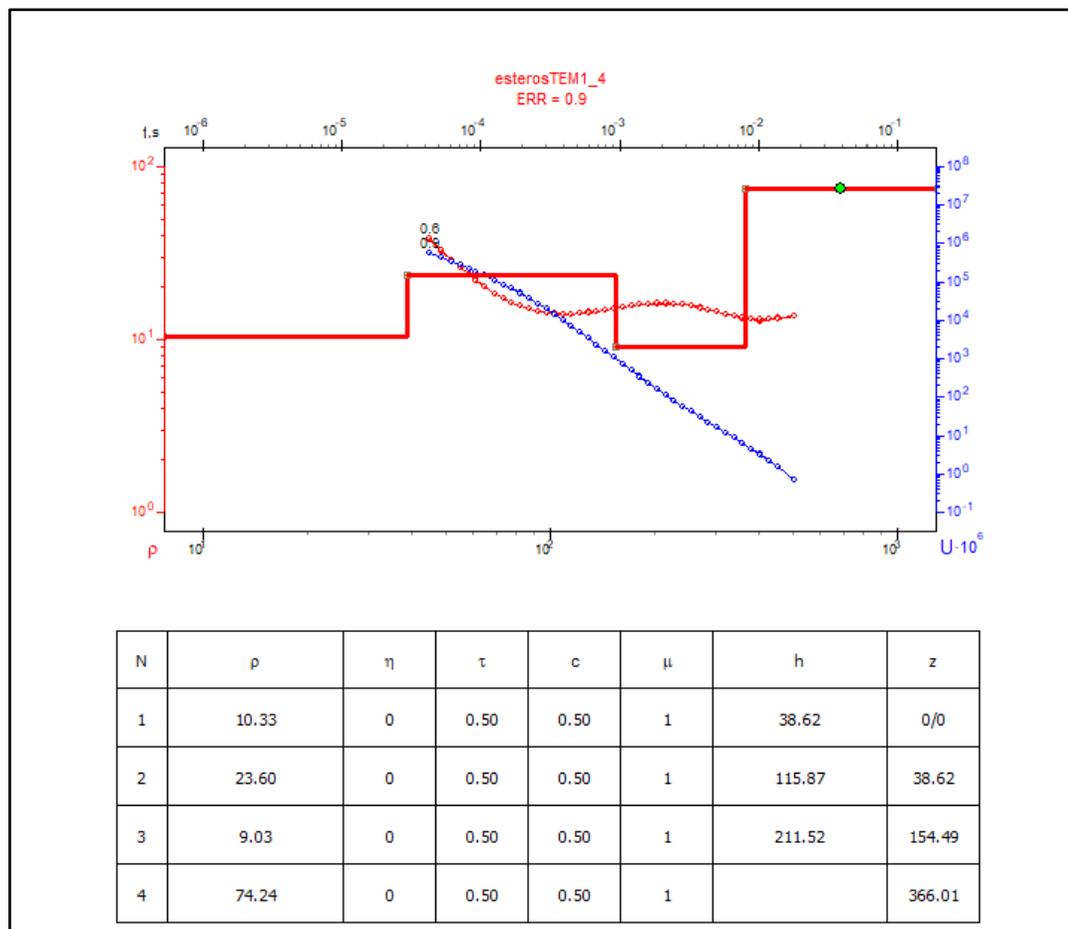


Figura 10-25: Perfil de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de TDEM Sitio 2.

10.2.2.3 Sitio 3

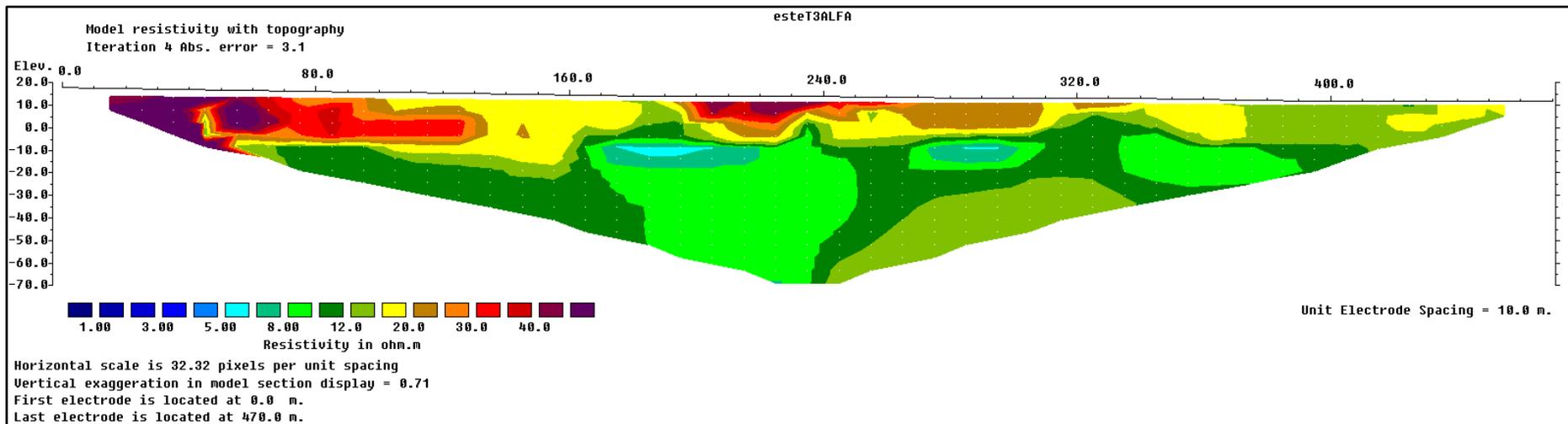


Figura 10-26: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 3 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.

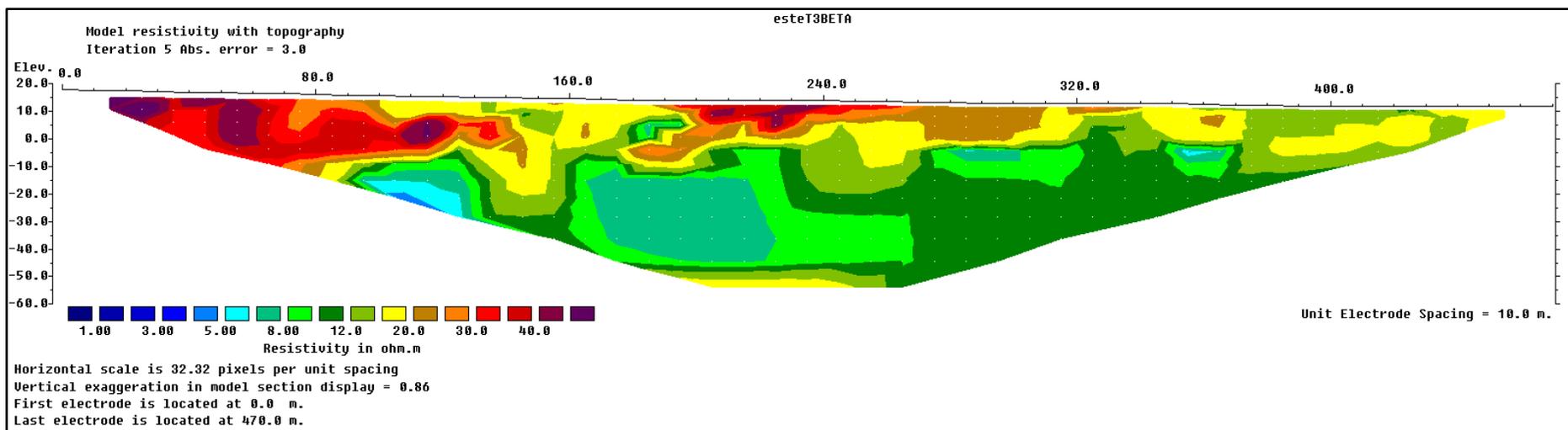


Figura 10-27: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 3 utilizando un dispositivo Wenner Beta.

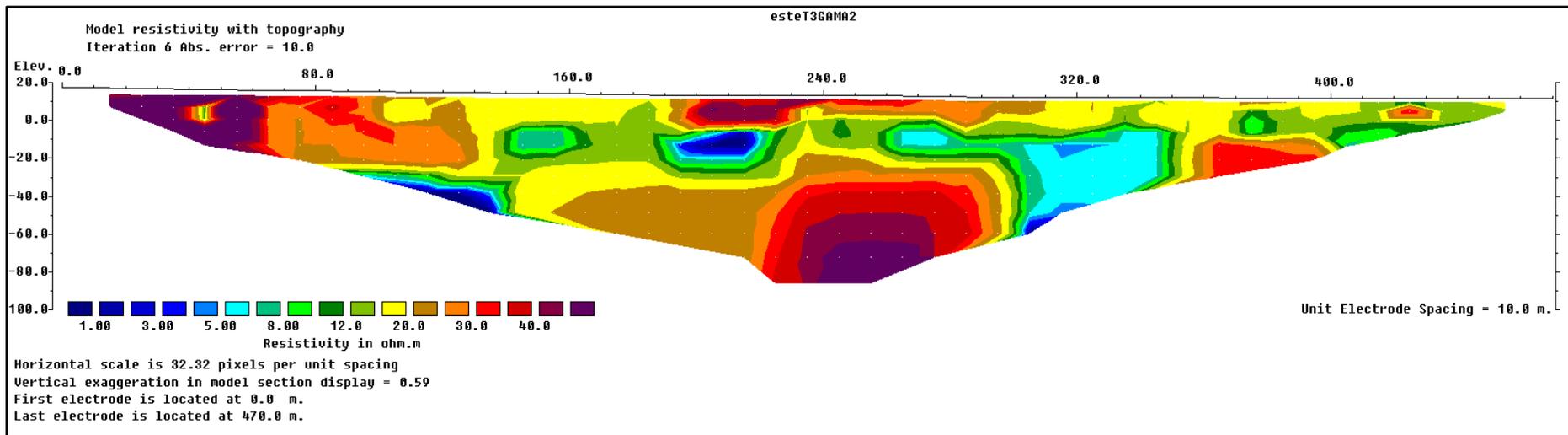


Figura 10-28: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 3 utilizando un dispositivo Wenner Gamma.

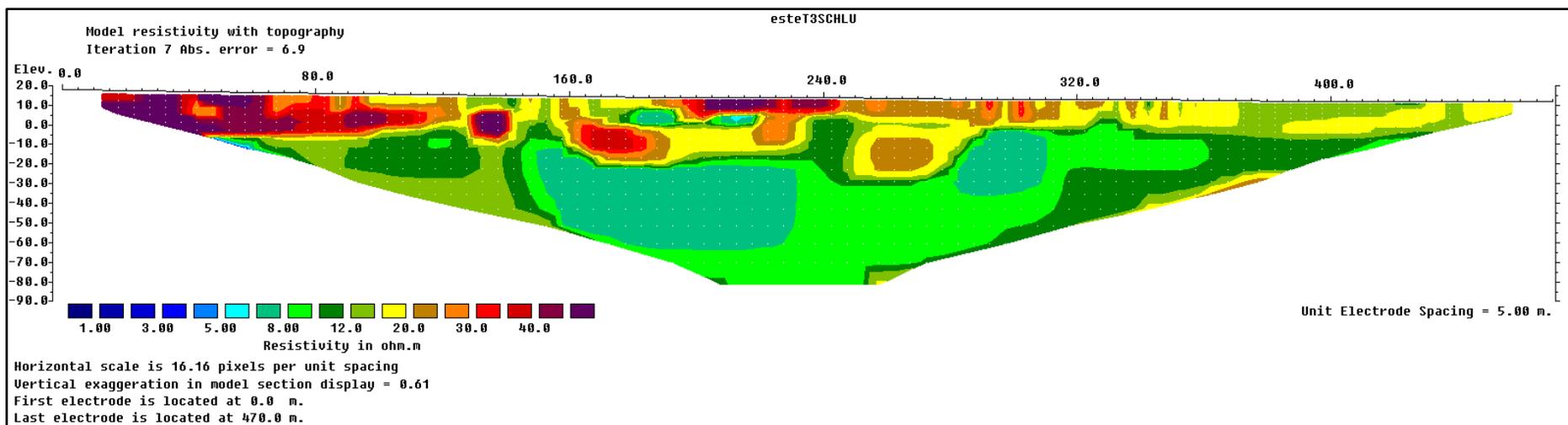


Figura 10-29: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 3 utilizando un dispositivo Wenner Schlumberger.

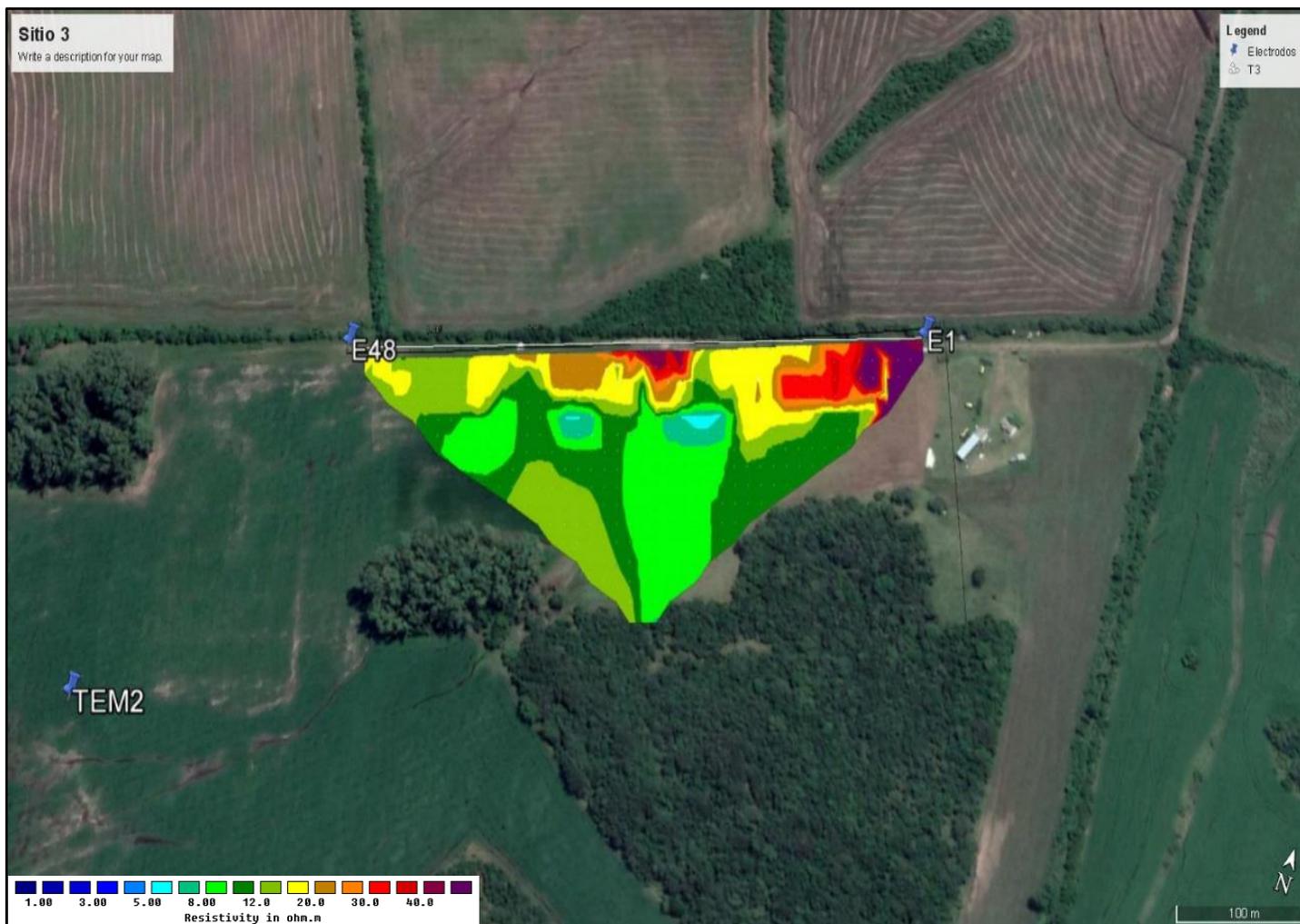


Figura 10-30: Resultado de ERT sitio 3, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 90 m.

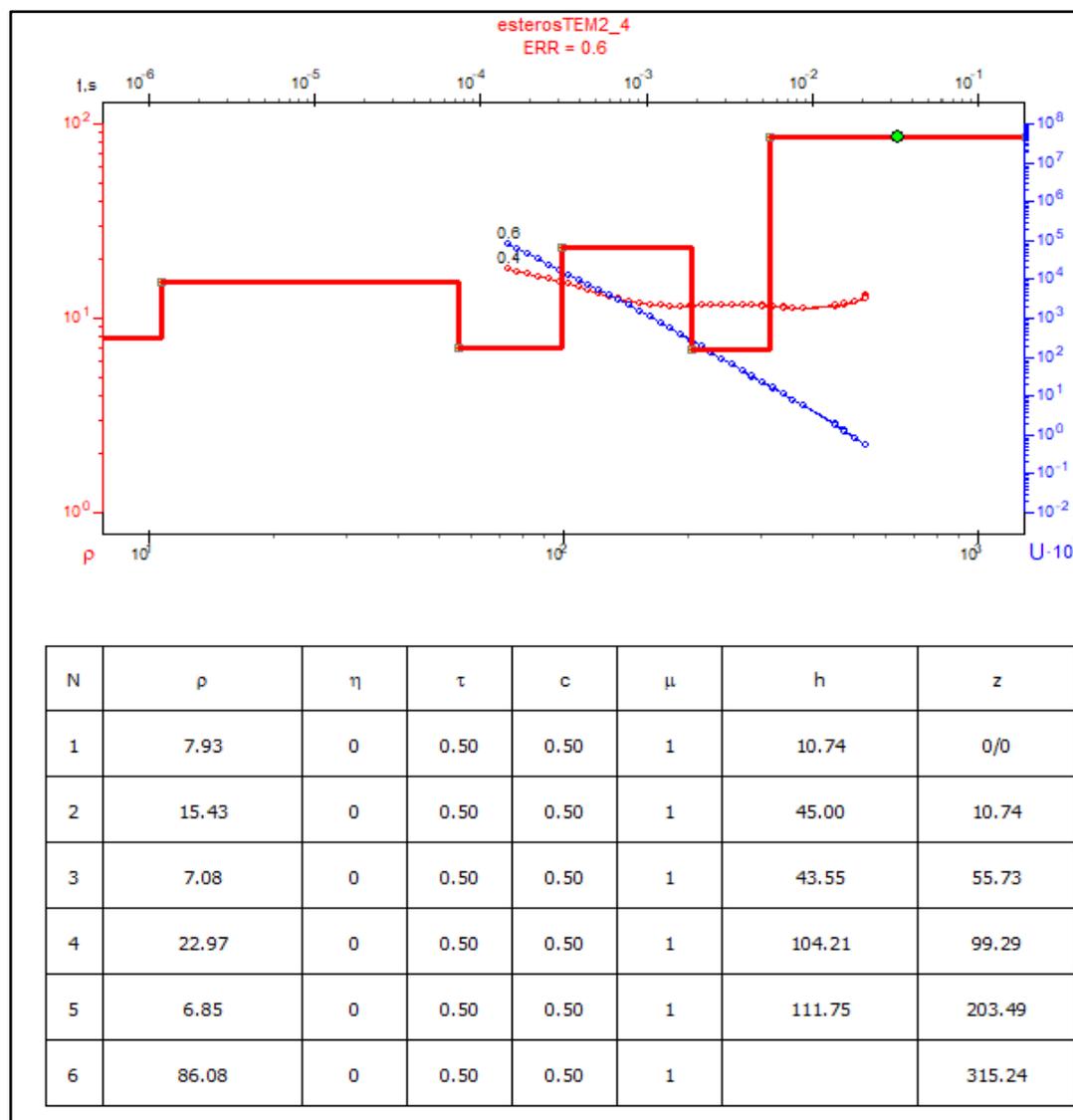


Figura 10-31: Perfil de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de TDEM Sitio 3.

10.2.2.4 Sitio 4

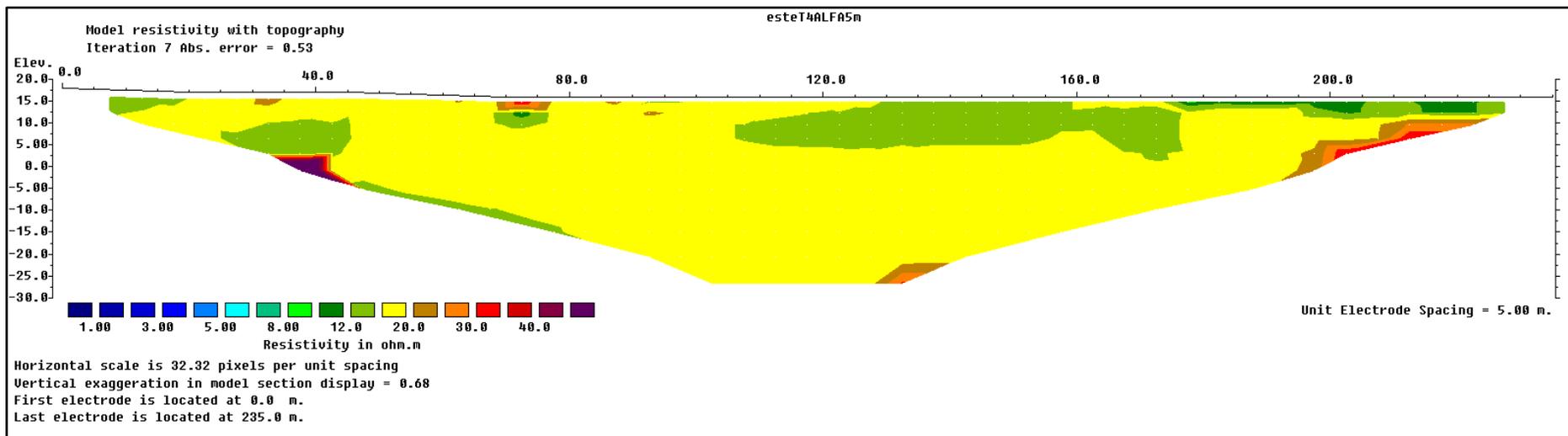


Figura 10-32: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 4 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.

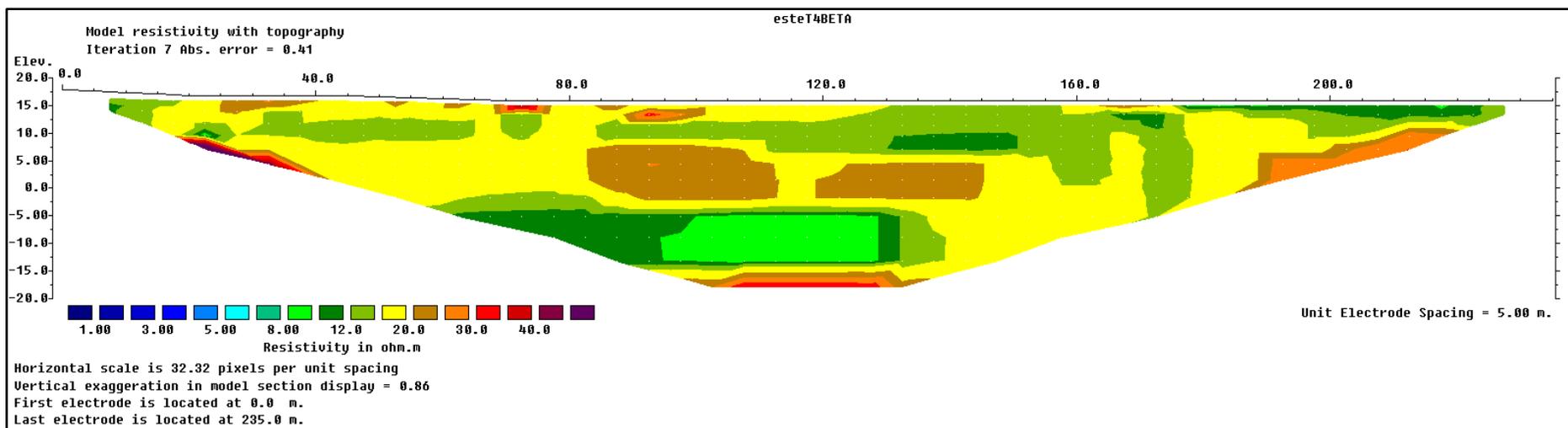


Figura 10-33: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 4 utilizando un dispositivo Wenner Beta.

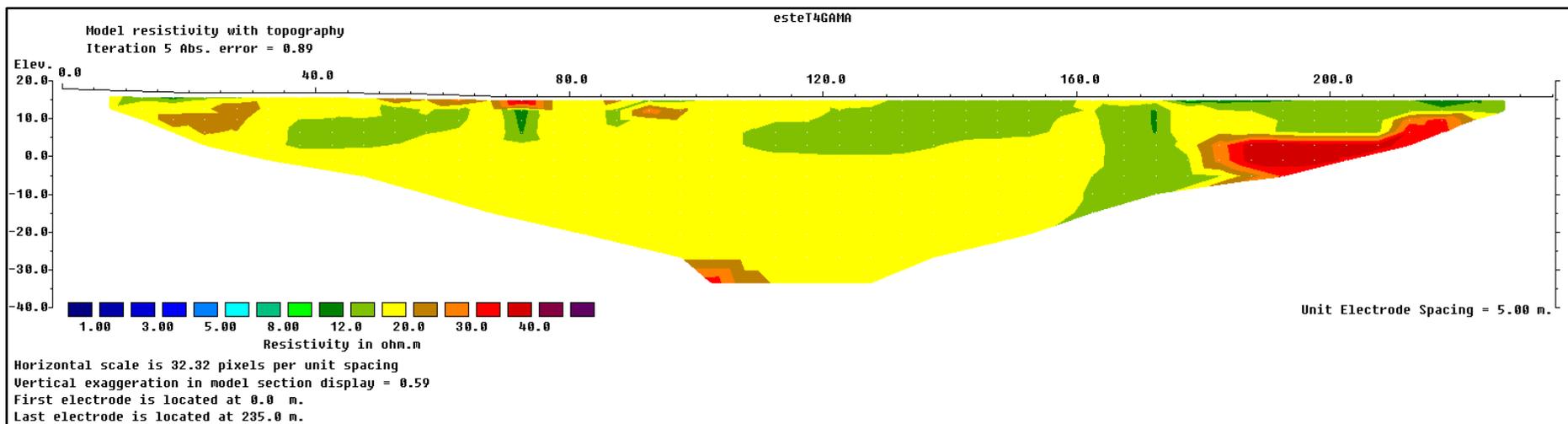


Figura 10-34: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 4 utilizando un dispositivo Wenner Gamma.

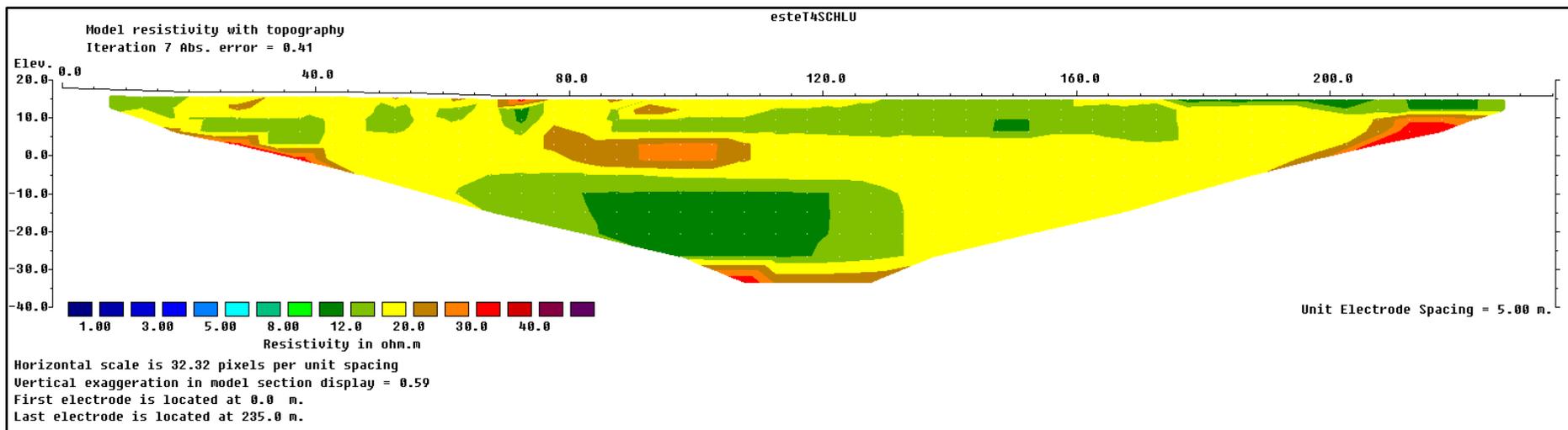


Figura 10-35: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 4 utilizando un dispositivo Wenner Schlumberger.



Figura 10-36: Resultado de ERT sitio 4, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 50 m.

10.2.2.5 Sitio 5

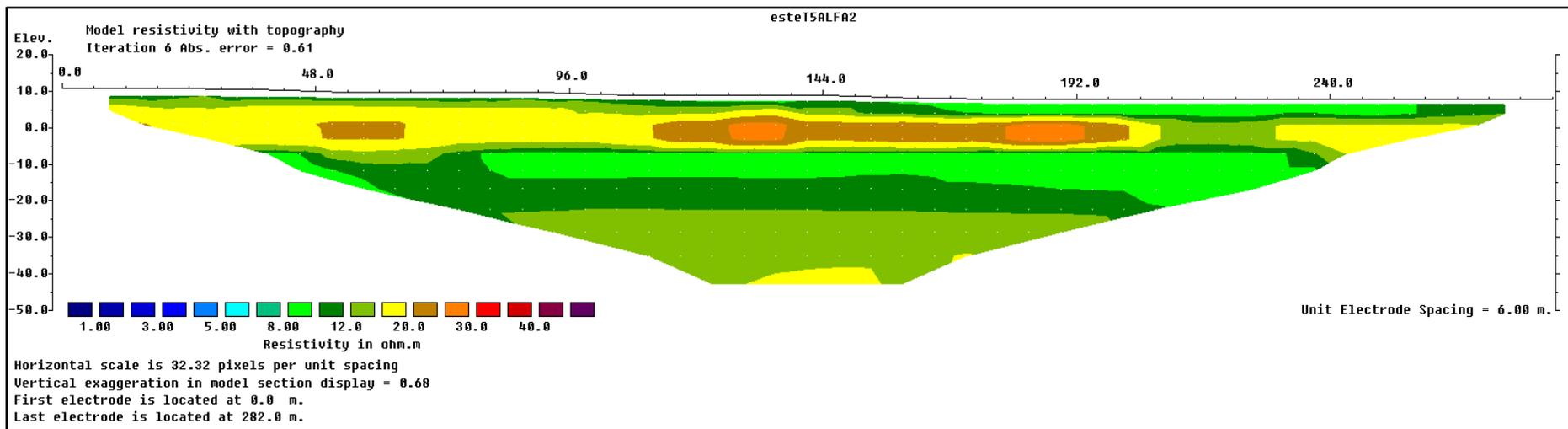


Figura 10-37: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 5 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.

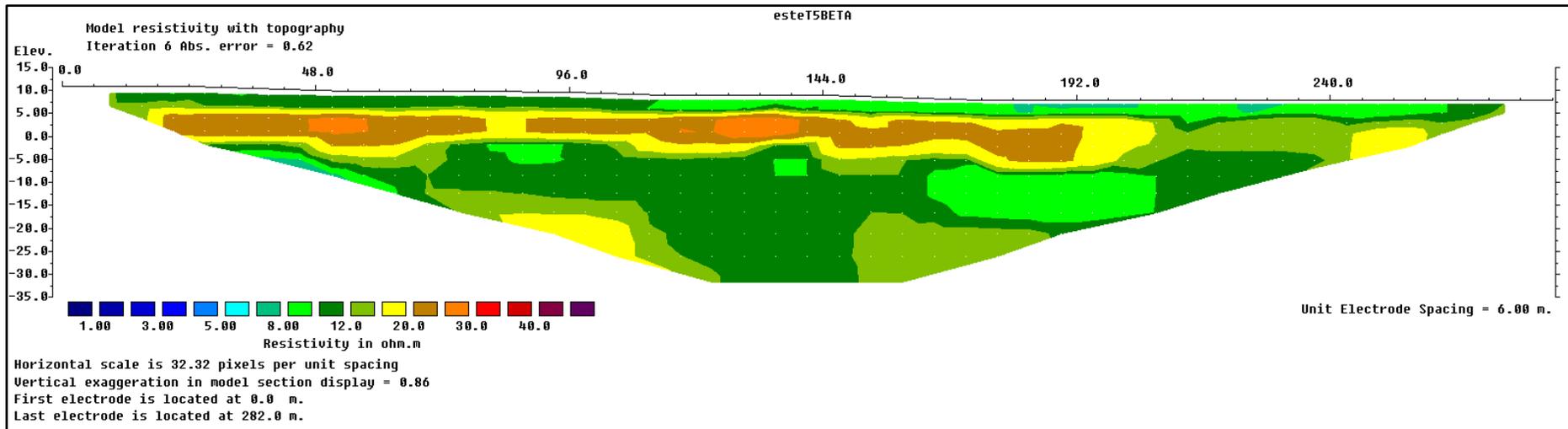


Figura 10-38: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 5 utilizando un dispositivo Wenner Beta.

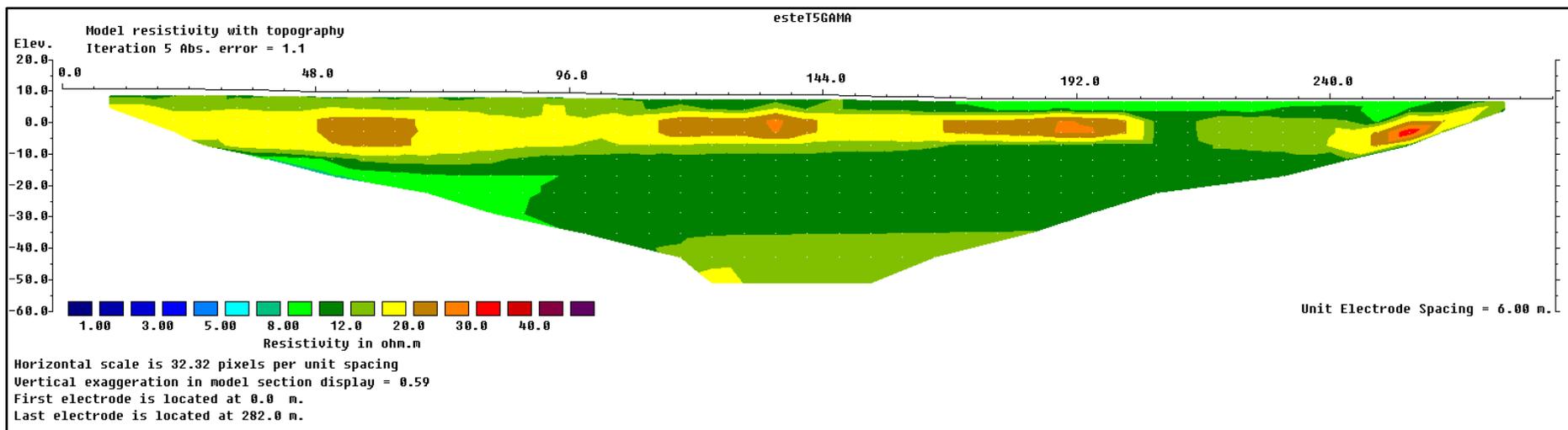


Figura 10-39: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 5 utilizando un dispositivo Wenner Gamma.

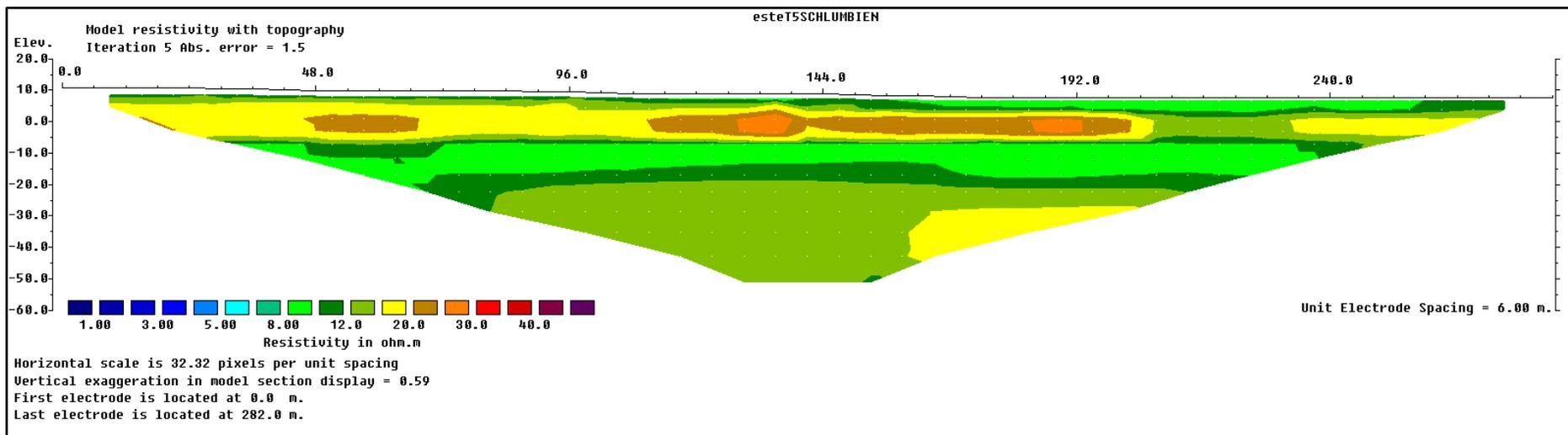


Figura 10-40: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 5 utilizando un dispositivo Wenner Schlumberger.



Figura 10-41: Resultado de ERT sitio 5, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 60 m.

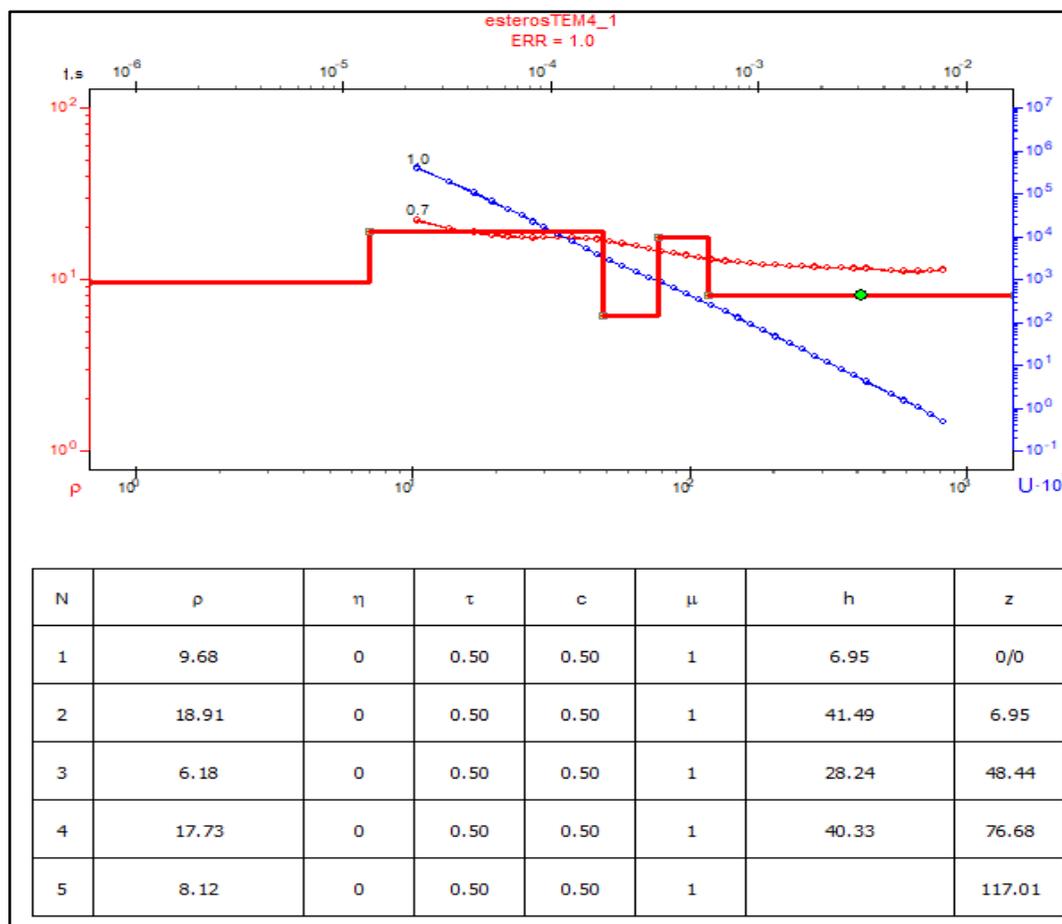


Figura 10-42: Perfil de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de TDEM Sitio 5.

10.2.2.6 Sitio 6

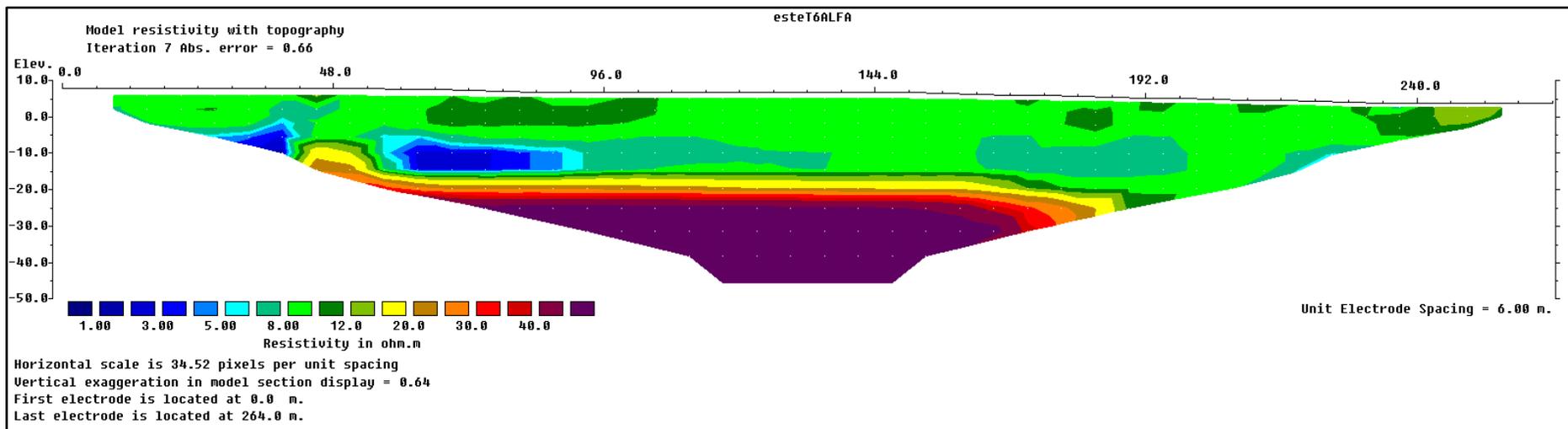


Figura 10-43: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 6 utilizando un dispositivo Wenner Alpha.

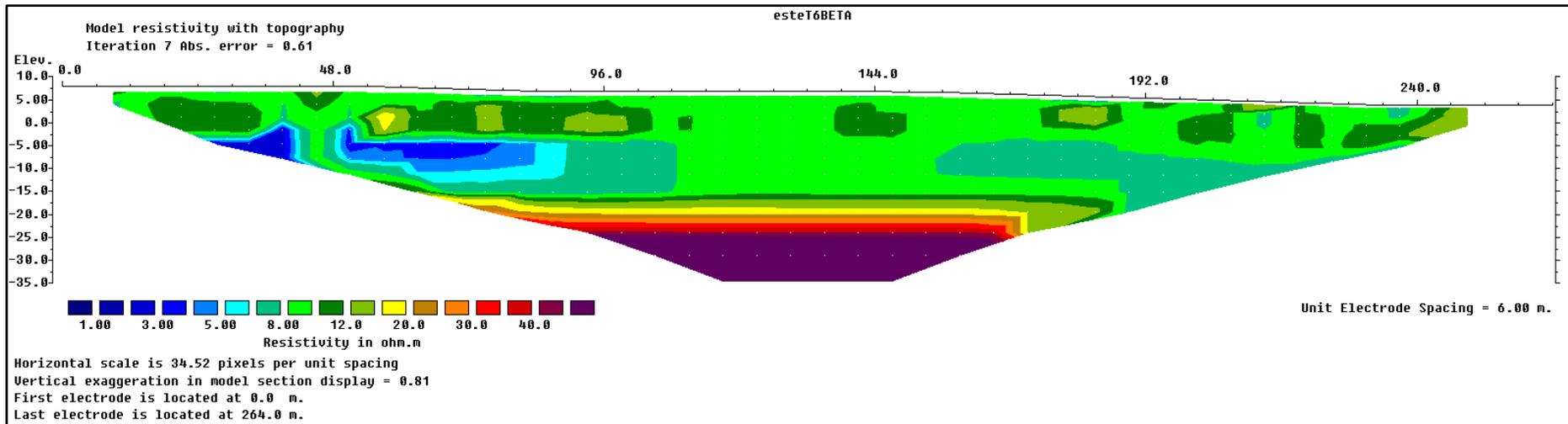


Figura 10-44: Sección de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de ERT Sitio 6 utilizando un dispositivo Wenner Beta.

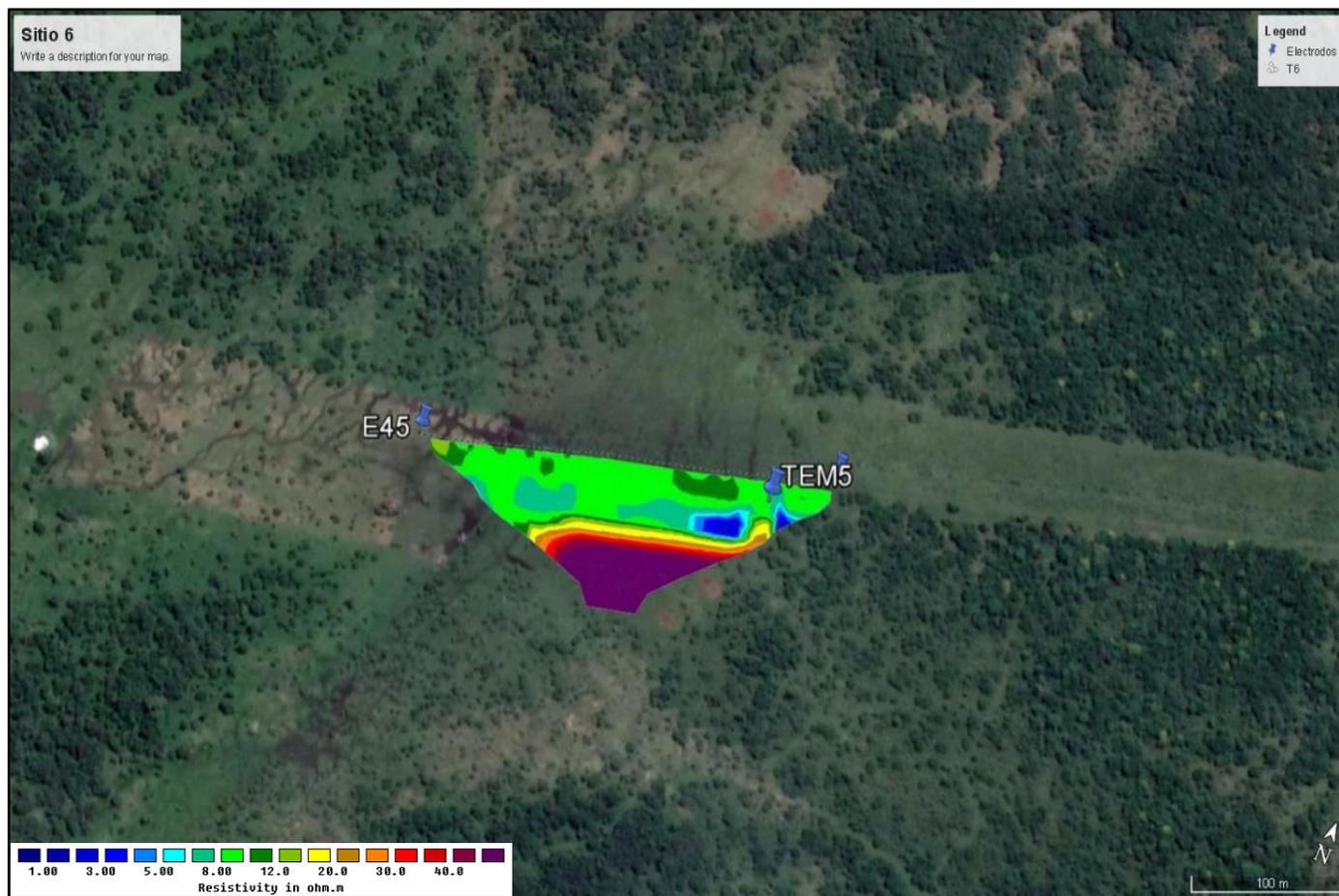


Figura 10-45: Resultado de ERT sitio 6, arreglo Wenner Alpha. Profundidad de relevamiento 60 m.

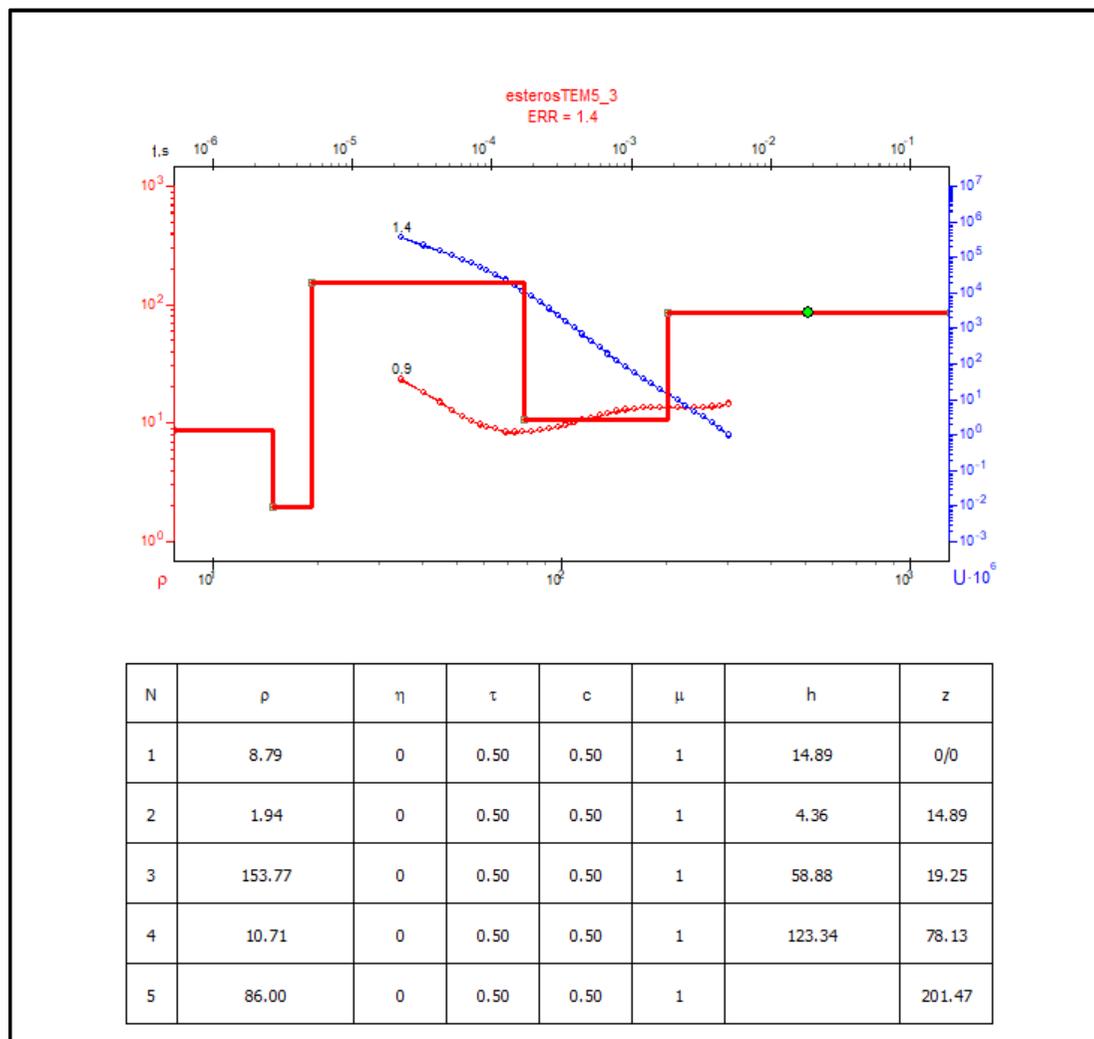


Figura 10-46: Perfil de resistividades obtenidas a partir de la inversión de las medidas de TDEM Sitio 6.

10.3 Hidroquímica

10.3.1 Recolección y análisis de muestras

Recipientes

Se han utilizado los recipientes listados en la Tabla 14 para el almacenamiento de las diferentes muestras.

Tabla 14: Recipientes utilizados para colecta de muestras.

Variable a determinar	Envase	Volumen (ml)
Cationes y elementos traza	Polietileno	60
Aniones	Polietileno	60
Alcalinidad	Polietileno	500

Extracción de agua

Todos los pozos se purgaron antes del muestreo. Para ello se extrae agua continuamente con la bomba sumergible del pozo, durante un período de tiempo durante el cual se mide temperatura, pH y CE. Luego de que las lecturas muestran una estabilización de los parámetros monitoreados, se procede a realizar el muestreo.

Muestreo

Muestreo de alcalinidad: se lava el envase de polietileno de 500 mL con agua destilada y agua del pozo (3 veces). Luego se llena con el agua de la muestra y se cierra sin que queden burbujas en su interior.

Muestreo de cationes y elementos traza: se lavan los envases de 60 mL con agua destilada y agua de la muestra filtrada (3 veces). Las muestras se pasan por un filtro de PVDF de 0.45 μm de tamaño de poro. El filtro se descarta después de cada filtrado. El filtrado se realiza con jeringa de polietileno y porta-filtro de polipropileno, de 2,5 cm de diámetro. El material de filtrado se lava 3 veces con agua destilada antes de cambiar de muestra.

Muestreo de aniones: igual que el muestreo de cationes y elementos traza.

Conservación

Todas las muestras colectadas se colocan en conservadoras, en ausencia de luz y a una temperatura inferior a los 4 °C.

En el caso de las muestras para determinación de cationes y elementos traza se agregan algunas gotas de ácido nítrico puro para análisis para evitar su precipitación, hasta alcanzar pH=2. El pH se mide con banditas.

Transporte

Todas las muestras se transportaron desde el área de estudio hasta las oficinas del IMFIA manteniendo las condiciones de ausencia de luz y temperatura por debajo de 4° C.

Para las muestras enviadas a Actlabs se mantuvieron las condiciones de conservación antes mencionadas hasta que se retiró por parte del servicio de envío internacional (Fedex).

Custodia

Las muestras enviadas a Canadá (Actlabs) fueron entregadas al servicio de transporte en paquete cerrado y refrigeradas con gel congelante, siendo posteriormente entregadas directamente al laboratorio.

Análisis de laboratorio

En el laboratorio Actlabs, mediante ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) se determinaron 67 elementos (Na, K, Ca, Mg, Li, Be, Al, Si, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th y U).

Por cromatografía de iones se determinó el contenido en F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Br⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻ y SO₄²⁻ disueltos. Cuando se superaron los límites superiores de detección por ICP-MS se analizaron por ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emisión Spectrometry), que permite determinaciones en soluciones con mayor concentración iónica. Estos métodos se caracterizan por su gran precisión y muy bajo umbral de detección.

La alcalinidad se determinó por titulación. Esta operativa se realizó en el laboratorio local (LAAI).

Los volúmenes de muestras necesarios y técnicas utilizadas, como la conservación de las muestras una vez extraídas, se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15: Métodos de conservación de las muestras.

Parámetros	Volumen muestra (ml)	Conservación
Alcalinidad	500	frío <4°C
Trazas	60	pH<2 Filtrada apertura<0.45 mm, frío <4°C
Aniones	60	Filtrada apertura<0.45 mm, frío <4°C

10.3.2 Resultados de análisis

Datos generales y análisis in situ

En la Tabla 16 se presentan los datos generales de cada sitio muestreado y los valores de temperatura, pH y conductividad analizados in situ con una sonda multiparamétrica Hanna Combo.

Las coordenadas de los puntos muestreados se encuentran en el sistema de coordenadas proyectadas UTM 21 S.

Tabla 16: Sitios Muestreados y parámetros fisicoquímicos básicos obtenidos.

ID	Muestra	X	Y	Tipo	Fecha	Hora	pH	T (°C)	CE (us/cm)
1	P4	400493.08	6374659.33	Pozo	15/04/2019	11:50	7	19.7	865
2	P5	398070.51	6380364.21	Pozo	15/04/2019	13:30	6.7	19.3	790
3	P7	403923	6381489	Pozo	15/04/2019	16:10	5.6	20	106
4	P8	414906	6369090	Pozo	15/04/2019	17:00	7.3	19.7	495
5	P9	409611	6377505	Pozo	15/04/2019	18:00	7.1	19.5	600
6	P10	400120	6385463	Pozo	15/04/2019	18:35	6.6	19.6	535
7	P11	401861.43	6364003.88	Pozo	17/04/2019	10:00	7.2	19.5	560
8	S1	399633	6373941	Superficial	15/04/2019	11:20	7.6	17.7	604
9	S3	395546.81	6381629.93	Superficial	16/04/2019	17:35	7.1	17.7	595
10	S4	403964.52	6368267.18	Superficial	17/04/2019	13:30	7.2	16.9	585
11	S5	404714.77	6381110.58	Superficial	17/04/2019	15:30	7	22.3	72
12	LG1	394581.33	6379803.91	Laguna	16/04/2019	12:00	8.2	17.3	80
13	LC1	394007.57	6380368.27	Laguna	16/04/2019	13:30	7.5	20.2	77
14	I1	394131.82	6380240.75	Subsuperficial	16/04/2019	13:00	6.3	22	318

Análisis químicos

En la Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 se presentan los resultados de análisis obtenidos en ActLabs para todos los elementos químicos analizados.

Tabla 17: Resultados de análisis químicos realizados en ActLabs.

Elemento	Na	Li	Be	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe
<i>Unidad de concentración</i>	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
<i>Límite de detección</i>	5	1	0.1	2	2	200	30	700	1	0.1	0.1	0.5	0.1	10
<i>Técnica</i>	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
<i>P4</i>	115000	24	< 0.2	10100	8	41900	5210	66200	10	5.7	51.4	1.1	0.8	< 20
<i>P5</i>	17100	38	< 0.2	36500	6	50400	17100	97400	11	6.4	112	< 1	3.6	< 20
<i>P7</i>	3600	5	0.4	1690	569	24400	9640	8600	6	117	7	1.8	47.2	1720
<i>P8</i>	71200	15	< 0.2	4130	< 4	37200	2630	41200	8	4.7	33.1	< 1	1.5	< 20
<i>P10</i>	25800	21	< 0.2	11500	< 4	42000	5680	73500	10	5.5	46.3	< 1	< 0.2	< 20
<i>P11</i>	84000	13	< 0.2	5330	< 4	33800	3580	43000	8	4.4	26.8	< 1	0.4	< 20
<i>S1</i>	49600	22	< 0.2	11400	9	34200	5130	74100	8	4.8	49.2	< 1	18.3	20
<i>S3</i>	37700	22	< 0.2	11500	6	37400	5710	80800	9	5.4	53.4	< 1	14.2	< 20
<i>S4</i>	71800	18	< 0.2	8730	14	37500	5220	55400	9	5.7	35	< 1	13.7	< 20
<i>S5</i>	4040	2	< 0.2	1870	161	4500	5480	5800	< 2	23.6	2	< 1	33	720
<i>I1</i>	24200	2	< 0.2	34600	336	30300	560	66000	8	11.4	8.4	1.1	62.9	340
<i>LG1</i>	3300	< 2	< 0.2	2700	22	4200	670	10000	< 2	1.8	1.2	< 1	13.4	150
<i>LC1</i>	2410	< 1	< 0.1	2670	24	7200	610	9400	2	1.7	1.1	< 0.5	42	170

Tabla 18: Resultados de análisis químicos realizados en ActLabs.

Elemento	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo
<i>Unidad de concentración</i>	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L									
<i>Límite de detección</i>	0.005	0.3	0.2	0.5	0.01	0.01	0.03	0.2	0.005	0.04	0.003	0.01	0.005	0.1
<i>Técnica</i>	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS									
<i>P4</i>	0.128	< 0.6	< 0.4	7.1	< 0.02	< 0.02	26.2	< 0.4	3.41	485	0.022	< 0.02	< 0.01	1.3
<i>P5</i>	0.207	< 0.6	0.6	8.6	< 0.02	< 0.02	25.9	< 0.4	3.03	1410	0.028	< 0.02	< 0.01	0.6
<i>P7</i>	0.6	0.8	11.5	78	0.86	< 0.02	3.17	< 0.4	9.7	62.2	5.16	3.8	0.369	0.3
<i>P8</i>	0.078	< 0.6	0.8	36.9	< 0.02	< 0.02	21.5	< 0.4	1.76	276	0.017	0.02	< 0.01	0.9
<i>P10</i>	0.133	< 0.6	0.8	6.4	< 0.02	< 0.02	18.3	< 0.4	1.92	618	0.013	< 0.02	< 0.01	0.7
<i>P11</i>	0.082	< 0.6	< 0.4	71	< 0.02	< 0.02	13	< 0.4	2.33	262	0.012	< 0.02	< 0.01	1.6
<i>S1</i>	0.23	< 0.6	0.6	19	< 0.02	< 0.02	22.2	< 0.4	3.54	651	0.084	0.05	< 0.01	1
<i>S3</i>	0.228	< 0.6	0.6	3.6	< 0.02	< 0.02	22.4	< 0.4	2.95	697	0.082	< 0.02	< 0.01	0.6
<i>S4</i>	0.17	< 0.6	0.7	4.7	< 0.02	< 0.02	18.5	< 0.4	3.12	475	0.095	0.05	< 0.01	1.1
<i>S5</i>	0.491	1.2	2.6	75.1	0.1	< 0.02	1.6	< 0.4	7.29	54.8	0.538	0.97	0.07	0.8
<i>I1</i>	0.821	0.9	4.1	134	0.07	< 0.02	0.52	< 0.4	0.747	424	2.89	0.28	< 0.01	< 0.2
<i>LG1</i>	0.271	0.7	2.6	5.1	< 0.02	< 0.02	0.87	< 0.4	1.77	58.2	0.056	0.07	< 0.01	< 0.2
<i>LC1</i>	0.242	0.7	2	8.4	< 0.01	< 0.01	0.86	< 0.2	1.62	54.1	0.072	0.05	< 0.005	< 0.1

Tabla 19: Resultados de análisis químicos realizados en ActLabs.

Elemento	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Hg	Tl	Pb
<i>Unidad de concentración</i>	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L									
<i>Límite de detección</i>	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.02	0.2	0.001	0.01
<i>Técnica</i>	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS									
<i>P4</i>	0.005	< 0.002	0.003	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.04	< 0.4	< 0.002	0.21
<i>P5</i>	0.005	< 0.002	0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.04	< 0.4	0.003	0.19
<i>P7</i>	1.58	0.251	1.21	0.217	0.568	0.074	0.495	0.069	0.116	0.03	0.05	< 0.4	0.035	1.96
<i>P8</i>	< 0.002	< 0.002	0.002	< 0.002	0.003	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.04	< 0.4	< 0.002	0.2
<i>P10</i>	0.005	< 0.002	0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.04	< 0.4	< 0.002	0.13
<i>P11</i>	0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.04	< 0.4	< 0.002	0.48
<i>S1</i>	0.014	0.002	0.012	< 0.002	0.008	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.04	< 0.4	0.008	0.35
<i>S3</i>	0.011	< 0.002	0.013	< 0.002	0.004	< 0.002	0.004	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.04	< 0.4	0.006	0.11
<i>S4</i>	0.013	0.002	0.015	0.002	0.009	< 0.002	0.011	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.04	< 0.4	0.008	0.24
<i>S5</i>	0.128	0.019	0.099	0.016	0.049	0.009	0.05	0.007	0.027	0.005	< 0.04	< 0.4	0.013	0.85
<i>I1</i>	0.478	0.082	0.419	0.089	0.249	0.034	0.21	0.032	0.009	< 0.002	< 0.04	< 0.4	0.009	1.42
<i>LG1</i>	0.013	< 0.002	0.01	0.002	0.007	< 0.002	0.004	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.04	< 0.4	0.006	0.13
<i>LC1</i>	0.013	0.002	0.011	0.002	0.008	0.001	0.006	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.02	< 0.2	0.005	0.12

Tabla 20: Resultados de análisis químicos realizados en ActLabs.

Elemento	Bi	Th	U	F	Cl	NO2 (as N)	Br	NO3 (as N)	PO4 (as P)	SO4
<i>Unidad de concentración</i>	ug/L	ug/L	ug/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<i>Límite de detección</i>	0.3	0.001	0.001	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02	0.03
<i>Técnica</i>	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC
<i>P4</i>	< 0.6	< 0.002	8.88	0.19	29.2	< 0.03	0.11	0.28	0.14	110
<i>P5</i>	< 0.6	< 0.002	6.97	0.59	9.14	0.04	0.12	5	0.12	9.04
<i>P7</i>	< 0.6	0.518	0.465	0.02	3.58	0.01	< 0.03	3.75	0.19	5.34
<i>P8</i>	< 0.6	< 0.002	2.81	0.21	4.21	< 0.02	< 0.06	0.02	0.14	20.1
<i>P10</i>	< 0.6	< 0.002	5.17	0.49	6.12	< 0.02	0.14	2.94	0.09	7.59
<i>P11</i>	< 0.6	< 0.002	6.75	0.31	5.44	< 0.02	< 0.06	1.06	0.14	17.1
<i>S1</i>	< 0.6	0.006	9.13	0.47	4.72	0.04	< 0.06	0.66	0.07	17.6
<i>S3</i>	< 0.6	0.002	5.78	0.41	6.08	0.03	0.08	1.86	0.05	10.8
<i>S4</i>	< 0.6	0.008	7.24	0.37	6.37	0.03	< 0.06	1.67	0.06	11.4
<i>S5</i>	< 0.6	0.102	0.068	0.07	3.06	0.01	0.04	0.06	0.02	0.15
<i>I1</i>	< 0.6	0.049	1.62	0.41	15	< 0.02	0.06	0.03	0.05	8.05
<i>LG1</i>	< 0.6	0.006	0.051	0.07	0.46	< 0.01	< 0.03	0.01	0.03	0.06
<i>LC1</i>	< 0.3	0.005	0.036	0.06	0.57	< 0.01	< 0.03	0.01	0.02	0.11

Análisis isotópicos

En la Tabla 21 se presentan los resultados de análisis obtenidos en el laboratorio de isótopos del Instituto de Geología y de Costas del Cuaternario de Mar del Plata, Argentina para los isótopos de oxígeno 18 y deuterio.

Tabla 21: Valores de ^{18}O y ^2H .

Muestra	pH	CE (us/cm)	$\delta^2\text{H}$, in ‰	$\delta^{18}\text{O}$, in ‰
P4	7	865	-32.8	-5.84
P5	6.7	790	-32.7	-5.83
P7	5.6	106	-22	-4.46
P8	7.3	495	-29	-5.42
P9	7.1	600	-28.8	-5.43
P10	6.6	535	-30.8	-5.51
P11	7.2	560	-28.8	-5.32
S1	7.6	604	-29	-5.22
S3	7.1	595	-30	-5.28
S4	7.2	585	-30.6	-5.51
S5	7	72	-20.3	-3.02
LG1	8.2	80	-15.1	-1.79
LC1	7.5	77	-15.9	-1.93
I1	6.3	318	-24.8	-4.37