

Informe de TNO

“Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA”

Estudio del Acuífero Patiño – Informe técnico 2.1:

Investigación geoelectrica en la Zona Piloto

Fecha

Diciembre de 2000

Autor

R.A. van Overmeeren

Netherlands Institute of
Applied Geoscience TNO
P.O.Box 6012
2600 JA Delft
The Netherlands
www.nitg.tno.nl

Código del proyecto

005.50363

Código del contrato

Contrato No 28/2000

Contratante

Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental (SENASA)

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced and/or published by print, photoprint, microfilm of any other means without the previous written consent of TNO.

In case this report was drafted on instructions, the rights and obligations of contracting parties are subject to either the Standard Conditions for Research Instructions given to TNO, or the relevant agreement concluded between the contracting parties. Submitting the report for inspection to parties who have a direct interest is permitted.

© 1998 TNO

Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO has main offices in Delft and Utrecht and branch locations in Heerlen, Nuenen and Zwolle.

The Institute is the central geoscience institute in the Netherlands for information and research on the sustainable management and use of the subsurface and its natural resources.

Netherlands Organization for
Applied Scientific Research TNO

The standard Conditions for Research Instructions given to TNO, as filed at the Registry of the District Court and the Chamber of Commerce in The Hague shall apply to all instructions given to TNO.

Resumen

En la zona piloto del acuífero Patiño, cerca de Asunción en Paraguay, se ejecutaron 50 sondeos eléctricos verticales con el fin de determinar la geometría y características de este importante acuífero. La Formación Patiño consiste en areniscas, con varios grados de consolidación. Tiene una granulometría que varía de fina y gruesa hasta gravillosa. En ciertos niveles ocurren conglomerados. Esta Formación de edad Cretácica está interrumpida por intrusiones de roca ígnea. Estas intrusiones han metamorfizado localmente las areniscas. Por lo demás, poco se conoce de esta Formación, ya que aflora en pocos lugares y los pozos perforados no llegan a más de 200 m de profundidad. Existen muchos pozos perforados en la zona de estudio porque se explota el acuífero a gran escala para el abastecimiento de agua en las zonas rurales y suburbanas y también para la industria cerca de Asunción. Sin embargo, en la zona piloto solo quedan registros litológicos de unos 16 pozos perforados por SENASA para las Juntas de Saneamiento.

Siendo una zona suburbana de la capital Asunción, el área está densamente poblada. Hay mucha infraestructura con redes de electricidad, teléfono y agua; sistemas de alta tensión afectan la zona, hay una red densa de torres de comunicación y gran parte de las calles están empedradas. Todo esto dificulta las mediciones geoeléctricas. Pero a pesar de estas fuentes perturbadoras, se lograron obtener 43 sondeos de buena o aceptable calidad, casi todos hasta una máxima distancia eléctrica ($L/2$) de 640 m.

Se pueden distinguir cuatro diferentes tipos de curvas geoeléctricas, y asignar estos grupos a 3 zonas geográficas bien distintas. En la parte septentrional del área de estudio, los sondeos eléctricos verticales indican que rocas de alta resistividad (160 - 410 Ωm) se extienden hasta una profundidad mayor que la profundidad de investigación (>400 m), con las máximas distancias eléctricas utilizadas. Estas rocas son las areniscas de la Formación Patiño, y posiblemente también de areniscas de formaciones más antiguas y subyacentes. En la parte meridional, al contrario, se encuentra debajo del acuífero una capa de baja resistividad (30 - 60 Ωm) indicando la presencia de estratos arcillosos o formaciones con agua de alta salinidad. La profundidad de esta capa, como deducida de los sondeos geoeléctricos, varía entre 170 y 350 m. En el sur y el centro del área de estudio se encuentra la tercera zona con rocas ígneas intrusivas y extrusivas de edad Terciaria. Un testimonio de estas últimas son los basaltos que afloran en el Cerro Ñemby. Las rocas ígneas producen resistividades muy altas (>1000 Ωm), como fueron deducidas de unos cuatro sondeos geoeléctricos. El cuarto grupo de tipos de curvas geoeléctricas probablemente también está relacionado con las intrusiones. Indican resistividades muy bajas (cerca de 10 Ωm) a poca profundidad, representando productos arcillosos de meteorización o posiblemente diques o filones sulfúricos y metalíferos. La actividad magmática ha alterado las

areniscas del acuífero Patiño, dejando areniscas metamórficas o meta-areniscas, como se puede observar en un afloramiento al noroeste del Cerro Ñemby. Consolidación y metamorfismo local explican la gran variación en la resistividad de la formación como deducida para el acuífero Patiño (160 - 600 Ω m). Mientras que en zonas no afectadas por las intrusiones, la porosidad es inter-granular, en zonas alteradas, el agua subterránea se limite a las zonas fracturadas de las areniscas densas y metamórficas.

La técnica de Sondeos Eléctricos Verticales comprobó ser un método excelente y eficaz para delinear la geometría del acuífero Patiño y determinar sus características. La recomendación principal es realizar una perforación exploratoria hasta la profundidad de 300 m para determinar la naturaleza de la capa de baja resistividad en la parte meridional de la zona piloto. Además se recomienda una perforación somera para establecer la composición del material de muy baja resistividad en las zonas de intrusiones. Finalmente se da recomendaciones para unos sondeos geoelectricos adicionales para aclarar el modelo geoelectrico del subsuelo en algunos sectores y para definir en mas detalle el limite entre las dos zonas principales.

Contenido

Resumen	i	
Lista de figuras	v	
Lista de tablas	viii	
1	Introducción general	1
1.1	Generalidades	1
1.2	La zona de estudio	1
2	Geología e hidrogeología	4
2.1	Contexto geológico	4
2.2	Pozos y perfilajes geofísicos	7
2.3	Estudios geofísicos anteriores	11
3	El método de resistividad eléctrica	12
4	El trabajo de campo	15
4.1	Generalidades	15
4.2	Ejemplos de curvas perturbadas	17
5	La interpretación	21
5.1	Empalmes	21
5.2	El proceso interpretativo	22
5.3	La interpretación cualitativa	23
5.3.1	Tipos de curvas	23
5.3.2	Isoresistividades aparentes	25
5.4	La interpretación cuantitativa	27
5.4.1	Los modelos geoeléctricos de los grupos de tipos de curvas	27
5.4.2	Equivalencia	32
5.4.3	Información adicional de pozos y perfilajes	35
5.4.4	Algunos casos especiales	39
6	Resultados de la investigación geoeléctrica	42
6.1	Generalidades	42
6.2	Los mapas	43
6.2.1	El mapa de la constitución (hidro-)geológica	43
6.2.2	El mapa de la resistividad de la Formación Patiño	45

6.2.3	El mapa de la profundidad hasta la capa de baja resistividad...	47
6.3	Los cortes geoelectricos.....	48
6.3.1	El corte geoelectrico A-A'	48
6.3.2	El corte geoelectrico B-B'	51
6.3.3	El corte geoelectrico C-C'	54
6.3.4	El corte geoelectrico D-D'	57
6.3.5	El corte geoelectrico E-E'	59
6.3.6	El corte geoelectrico F-F'	61
7	Conclusiones	63
8	Recomendaciones	64
8.1	Pozos exploratorios	64
8.2	Sondeos geoelectricos adicionales.....	66
8.3	Perfiles geoelectricas ('calicatas electricas').....	66
8.4	Mediciones magnetometricas	67
9	Agradecimientos	68
10	Referencias bibliograficas.....	69
	Anexos	
A	Los sondeos electricos verticales (SEV) y su interpretacion	
B	Mapa base	
C	Leyenda de los cortes geoelectricos	

Lista de figuras

Figura 1-1:	Ubicación de la zona de estudio en el Paraguay (arriba) y el mapa morfológico de la zona piloto con los principales arroyos (abajo).....	2
Figura 1-2:	Afloramiento de las areniscas (en parte metamórficas) de la Formación Patiño en la zona de estudio con vista hacia el Cerro Ñemby con sus lavas basálticas.....	3
Figura 2-1:	Columna estratigráfica de la ‘Antiforma de Asunción’ (según Gomez Duarte, 1991).....	4
Figura 2-2:	Mapa geológico de la provincia hidrogeológica Asunción con la extensión del bloque triangular del acuífero Patino (puntos densos, según Bartel y Muff (1995)).....	6
Figura 2-3:	Ubicación de los pozos profundos de las Juntas de Saneamiento en la zona de estudio.....	8
Figura 3-1:	El dispositivo Schlumberger para un sondeo eléctrico vertical	13
Figura 4-1:	Mediciones geoeléctricas en el área piloto del acuífero Patiño	15
Figura 4-2:	Mapa de ubicación de los SEV en la zona piloto del acuífero Patiño	16
Figura 4-3:	Ejemplos de sondeos perturbados por fuentes antropogéneas; arriba: inestabilidad de lectura debido a fuentes de corrientes escondidos; abajo izquierda: fuga de corriente después de lluvia; abajo derecha: línea de alta tensión	18
Figura 4-4:	Ejemplos de sondeos perturbados por fuentes geológicas; arriba: inhomogeneidades laterales; abajo izquierda: capas no horizontales debido a inclinadas intrusiones; abajo derecha: alta resistencia de suelo	20
Figura 5-1:	Traslado vertical del segmento central de la curva para corregir los empalmes	21
Figura 5-2:	El SEV 19 con dos formas de corregir el salto en el ultimo empalme del SEV 19; el traslado vertical del ultimo segmento cuadra mejor en el modelo regional.....	22
Figura 5-3:	Los cuatro principales tipos de curvas.....	24
Figura 5-4:	Mapa de la distribución de los cuatro grupos de tipos de curvas..	25
Figura 5-5:	Mapa de iso-resistividades aparentes (Ωm) para $AB/2 = 500 m$, destacando claramente las intrusiones de roca ígnea y sugiriendo ciertos lineamientos.	26
Figura 5-6:	El modelo geoeléctrico del grupo I; con adicionalmente una capa menos permeable para SEV 1.....	28
Figura 5-7:	El modelo geoeléctrico del grupo II	29
Figura 5-8:	El modelo geoeléctrico del grupo III.....	30

Figura 5-9:	El modelo geoelectrico del grupo IV	32
Figura 5-10:	Ejemplos de curvas simples en la zona de estudio; izquierda: una curva de 2 capas; derecha: una curva de 3 capas con dos soluciones equivalentes.	33
Figura 5-11:	Ejemplos de equivalencia en curvas en la zona de estudio y de solucionar este problema con conceptos hidrogeológicos consistentes	34
Figura 5-12:	Ejemplo de equivalencia en el SEV 45 y de solucionar este problema con conceptos hidrogeológicos consistentes.....	35
Figura 5-13:	Mapa de la ubicación de los dos pozos con perfilaje eléctrico que sirve para el modelo geoelectrico de sondeos eléctricos verticales en la cercanía de los pozos.	36
Figura 5-14:	Perfilaje del pozo P3 en Caaguazu (CL-P0109) y SEV 3 efectuado en la cercanía del pozo; el registro LN ha sido acentuado con una línea gruesa.	37
Figura 5-15:	Perfilaje del pozo 43 en Pai Ñu (CL-P0140) y los SEV 25 y 50 efectuados en la cercanía del pozo; el registro LN ha sido acentuado con una línea gruesa.	38
Figura 5-16:	SEV con dudas sobre a interpretación de la ultima capa; izquierda: los puntos medidos; derecha: los dos modelos	39
Figura 5-17:	SEV31 con dos interpretaciones equivalentes. Modelo de línea discontinua: modelo inicial con capa de arenisca metamórfica; modelo de línea continua: modelo con intrusión de roca ígnea en areniscas.....	40
Figura 5-18:	Ejemplos de sondeos fuertemente perturbados en la zona de estudio.....	41
Figura 6-1:	La zona de investigación con la ubicación de los sondeos geoelectricos y los cortes	42
Figura 6-2:	Mapa de la distribución de los cuatro grupos de sondeos geoelectricos, representando la constitución (hidro-)geológica. Círculos: acuífero sin base de baja resistividad; cruces: acuífero con base de baja resistividad; triángulos cerrados: intrusiones de roca ígnea; triángulos abiertos: arcillas producidas por meteorización de roca ígnea o diques o filones metalíferos.	45
Figura 6-3:	Mapa de la resistividad de la Formación Patiño en la zona piloto. El intervalo entre las curvas de iso-resistividad es 100 Ω m. Los cruces marcan los sondeos geoelectricos.....	46
Figura 6-4:	Mapa de la profundidad hasta la base del acuífero. El intervalo entre las curvas de nivel es 25 m. Los cruces marcan los sondeos geoelectricos.	48
Figura 6-5:	El corte geoelectrico A-A'	50
Figura 6-6:	El corte geoelectrico B-B'	52

Figura 6-7:	SEV 41 y dos sondeos eléctricos verticales efectuados en la cercanía del SEV 41: testimonios de circunstancias anómalas y de la presencia de depósitos o artefactos conductores en el subsuelo.	53
Figura 6-8:	Perfil geoelectrico ('calicatas eléctricas') sobre la zona de muy baja resistividad en la cercanía del SEV 41.....	54
Figura 6-9:	El corte geoelectrico C-C'	55
Figura 6-10:	El SEV 9 (izquierda) y dos interpretaciones equivalentes (derecha), resultado de su ubicación en el limite entre dos zonas de diferente características.....	56
Figura 6-11:	El corte geoelectrico D-D'	58
Figura 6-12:	El corte geoelectrico E-E'	60
Figura 6-13:	El corte geoelectrico F-F'	62
Figura 8-1:	Los sondeos geoelectricos en al área recomendado para la perforación exploratoria.....	65
Figura 8-2:	Mapa con la ubicación del sitio recomendado para el pozo exploratorio profundo y los sondeos cercanos.....	65

Lista de tablas

Tabla 2-1:	Pozos profundos en el área de estudio con información geológica.....	9
Tabla 2-2:	La litología principal y particularidades encontrado en los pozos profundos	10
Tabla 5-1:	El modelo geoelectrico para curvas SEV del tipo I.	27
Tabla 5-2:	El modelo geoelectrico para curvas SEV del tipo II.....	29
Tabla 5-3:	El modelo geoelectrico para curvas SEV del tipo III.	30
Tabla 5-4:	El modelo geoelectrico para curvas SEV del tipo IV	31

1 Introducción general

1.1 Generalidades

Formando parte del proyecto 'Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA' (FEHS), se ejecutó una investigación geoelectrica en la zona piloto del acuífero Patiño. Esta investigación contribuye al estudio sistemático del acuífero que tiene como objetivo proporcionar la información y los conocimientos requeridos para la planificación regional o subregional de la explotación, el control y la protección de las aguas subterráneas. Objetivo adicional del plan piloto es el desarrollo de una metodología que se puede utilizar como modelo para futuros estudios similares en otras partes del país.

Los objetivos específicos del levantamiento geoelectrico en la zona piloto del acuífero Patiño son:

1. Determinar la geometría del acuífero, diferenciando entre capas permeables y zonas poco permeables o impermeables.
2. Detectar variaciones significantes de la salinidad del agua subterránea.

1.2 La zona de estudio

El área de estudio, siendo el área piloto del acuífero Patiño, está ubicada aproximadamente a 10 km al SE de la capital Asunción. Se trata de la cuenca de los arroyos Mbocayaty y Ñemby y abarca una extensión aproximada de 45 km² (Figura 1-1, Anexo B). La topografía se caracteriza por ser levemente ondulada, con alturas que oscilan entre 100 y 160 m sobre el nivel del mar. Excepción conspicua es el Cerro Ñemby en el sur, cuyos flujos de lava basáltica se elevan por encima de la zona a una altitud de 208 m (Figura 1-2).

Siendo una zona suburbana de la capital Asunción, el área es densamente poblado con una infraestructura correspondiente, los cuales dificultan la ejecución de mediciones geoelectricas. El centro del área es la localidad extensa de Ñemby. Hacia el norte se encuentran barrios periféricos de los municipios de Fernando de la Mora y San Lorenzo. En el sur de la zona, el principal centro habitacional es San Antonio, al borde del Río Paraguay. Existen muchos emplazamientos de plantas industriales, como de cemento (Cerro Ñemby), de textiles y de gaseosas (Coca Cola). Las vías de comunicación consisten de tres rutas asfaltadas, un gran numero de carreteras empedradas y también muchos caminos de tierra. Las vías asfaltadas son la autopista de doble vía de Asunción a Ñemby, y continuando hacia el Sur a Ypane y Villeta, y las carreteras de San Lorenzo a Ñemby y de Fernando de la Mora a San Antonio, pasando por Villa Elisa.

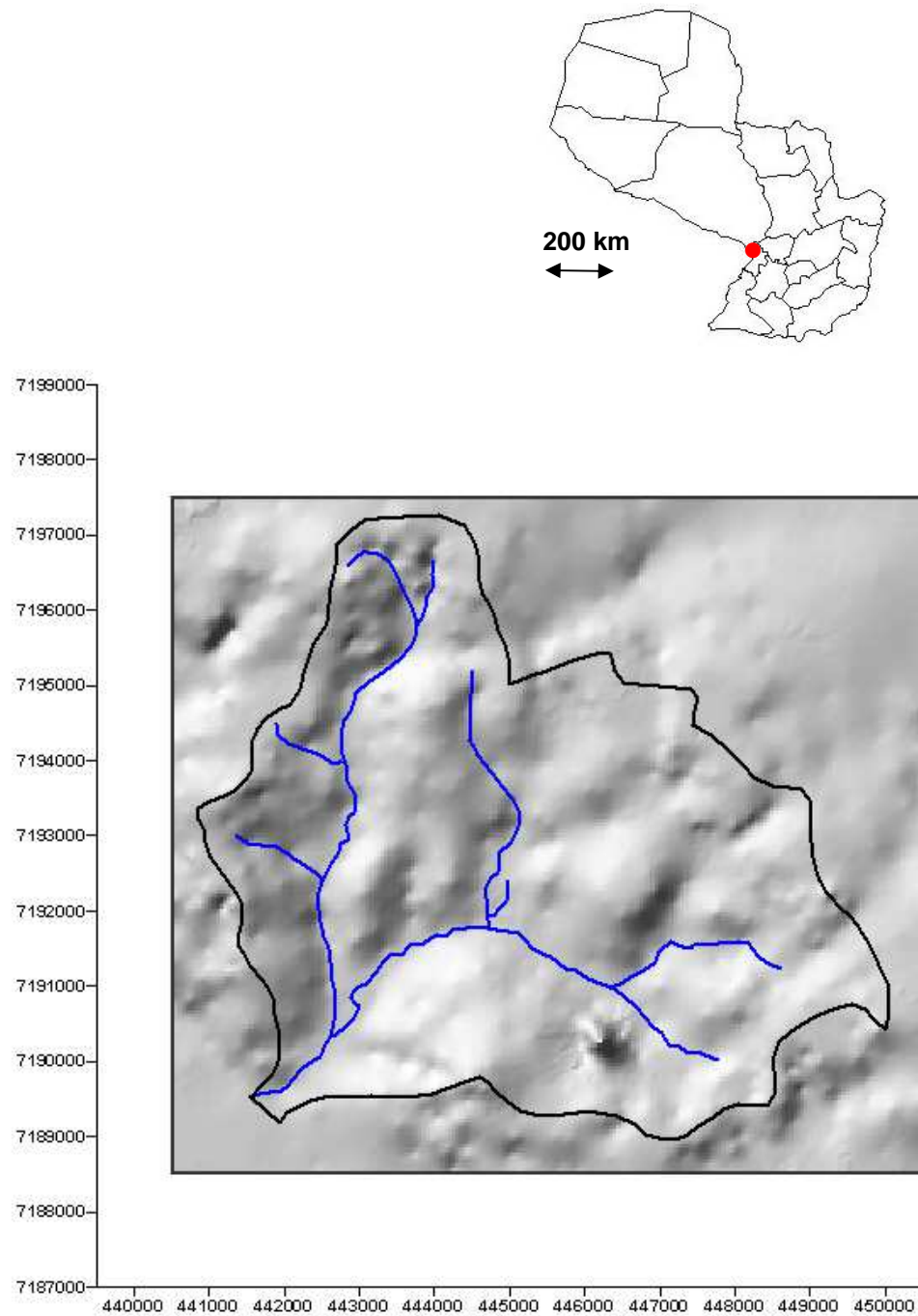


Figura 1-1: Ubicación de la zona de estudio en el Paraguay (arriba) y el mapa morfológico de la zona piloto con los principales arroyos (abajo).



Figura 1-2: Afloramiento de las areniscas (en parte metamórficas) de la Formación Patiño en la zona de estudio con vista hacia el Cerro Ñemby con sus lavas basálticas.

El abastecimiento de agua actual de la población se realiza a través de las Juntas de Saneamiento locales y por aguaterías o ‘baterías’ privadas. Ambos extraen el agua mediante pozos perforados en el acuífero Patiño. Otros usuarios del agua subterránea son las fábricas y industrias, mediante pozos propios.

El clima de la zona es subtropical, con una diferencia marcada entre el verano con temperaturas de 25 a más de 40°C, e el invierno en que las temperaturas pueden bajar a 5°C. Cae lluvia durante todo el año, pero el periodo de lluvias intensas es de Octubre a Abril. La precipitación anual en el área es entre 1200 y 1700 mm.

2 Geología e hidrogeología

2.1 Contexto geológico

La poca información existente de la geología de la zona de estudio y sus alrededores está resumida en las memorias de simposios sobre aguas subterráneas que se realizaron en Paraguay en 1991 y 1995. La terminología estratigráfica utilizada en estos volúmenes es algo confusa. Gomez Duarte (1991) presenta una columna estratigráfica de la 'Antiforma de Asunción', que comprende el alto topográfico entre Asunción y Paraguarí (Figura 2-1).

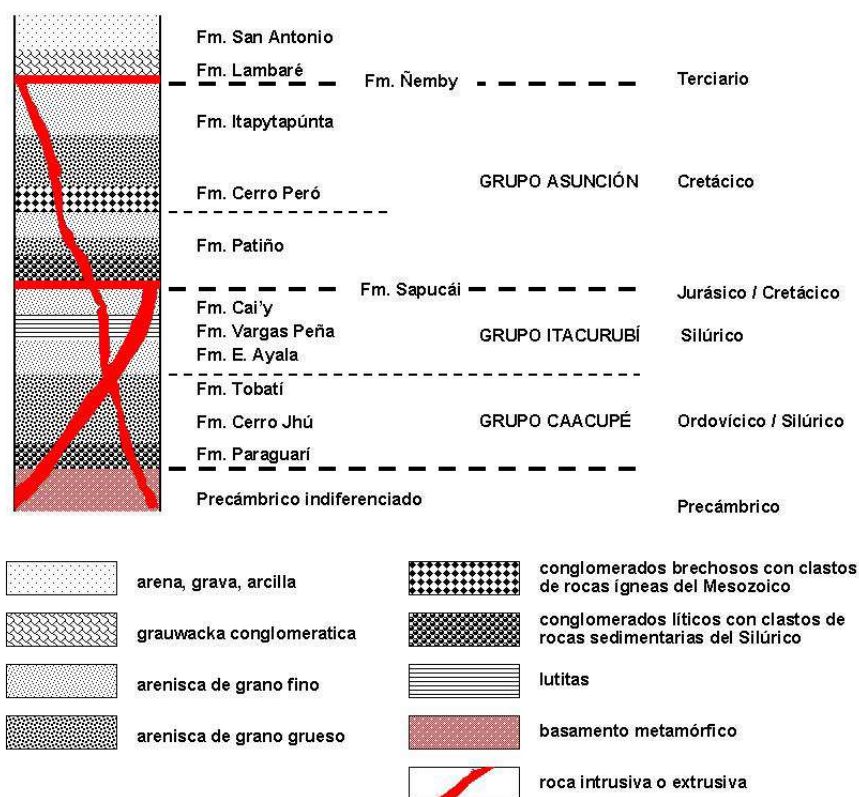


Figura 2-1: Columna estratigráfica de la 'Antiforma de Asunción' (según Gomez Duarte, 1991)

El basamento precámbrico está formado por gneises con bandas de cuarzo. Encima se encuentra el Grupo Caacupé (Ordovícico/Silúrico), con una base de conglomerados de clastos redondeados de cuarzo que pertenece a la Formación Paraguarí. Las otras formaciones de este grupo y las formaciones suprayacentes del Grupo Itacurubí (Silúrico) están compuestas de areniscas de grano fino a grueso y en parte de lutitas.

Reposa sobre estas formaciones una secuencia de sedimentos rojos, con una base de conglomerados con clastos de rocas sedimentarias del Silúrico, seguidos por conglomerados brechosos con clastos de rocas ígneas del Mesozoico. Enseguida se encuentra una serie gruesa de areniscas. Toda esta secuencia de edad Cretácica se considera como el Grupo Asunción, del cual la Formación Patiño constituye la parte inferior. Sin embargo, Gómez Duarte (1991) también habla del Grupo Patiño, donde incluye las Formaciones Ytapypunta y Lambaré) y ocasionalmente refiere a todo la secuencia como la Formación Patiño. En vista a esa confusión, se define en el presente informe la Formación Patiño *sensu lato*, quiere decir, se incluye en esta todos los sedimentos de edad Cretácica, que se depositaron después de eventos tectono-magmáticos del Cretácico y antes de las intrusivas del Terciario (Medio). En el Cerro Lambaré en Asunción afloran grauwackas diagenizadas, conteniendo clastos de rocas ígneas oscuras y fragmentos de las areniscas de la Formación Patiño.

La Formación Patiño del Grupo de Asunción consiste entonces de sedimentos continentales, levemente consolidados de edad Cretácico Inferior a Superior (Bartel y Muff, 1995). Son principalmente areniscas, compuestas de arenas de diferente tamaño y gravas. Los sedimentos, ferruginosos y de color rojo, fueron acumulados dentro de una pequeña fosa de rápida subsidencia y representan depósitos de abanico sin buzamientos considerables. En algunas columnas estratigráficas se observan una granulometría decreciente hacia la base, una parte media más gruesa y la parte superior otra vez más fina. Bartel y Muff (1995) presentan un mapa con la extensión de las rocas del Grupo Asunción (Figura 2-2). Muestra claramente la forma triangular de la depresión o cuenca en que las areniscas fueron depositadas. Presenta una superficie de afloramiento de aproximadamente 2000 km². La depresión fue creada parcialmente o enteramente por la tectónica, como las fallas con rumbo NE y NO que determinan el curso del Río Paraguay y que forman el límite occidental del triángulo.

Un ejemplo lucido de la presencia de roca ígnea, producto de actividad magmática en el Terciario Inferior, en la zona piloto son las lavas basálticas del Cerro Ñemby. Las intrusiones magmáticas han causado metamorfismo de contacto en las areniscas alrededores, convirtiéndolos en rocas más densas y duras. Este fenómeno se puede observar maravillosamente en un afloramiento, 2 km al noroeste del Cerro Ñemby (véase la foto en la Figura 1-2). Diques ígneos o filones metalíferos pueden formar barreras importantes para el flujo de agua subterránea en el acuífero Patiño.

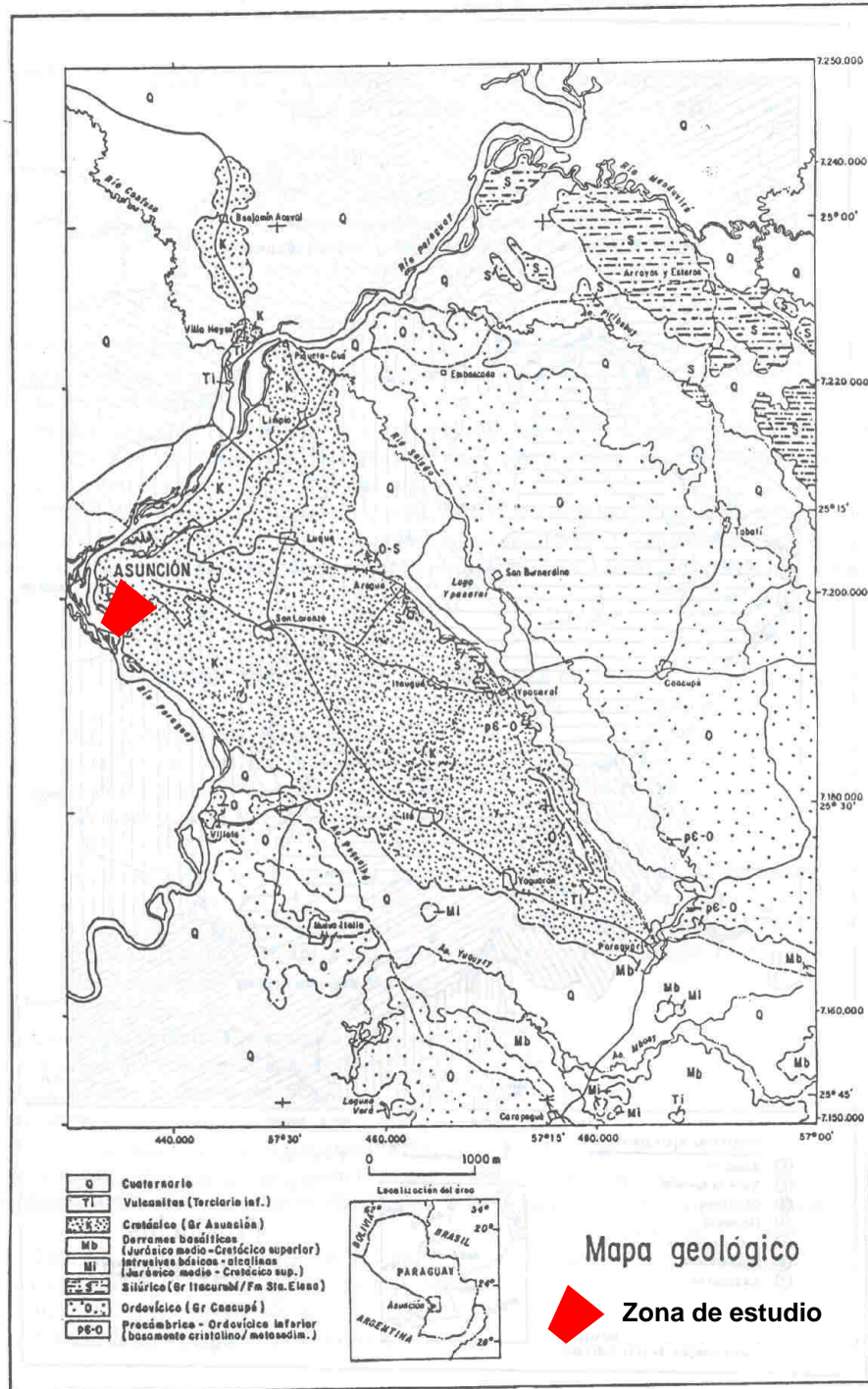


Figura 2-2: Mapa geológico de la provincia hidrogeológica Asunción con la extensión del bloque triangular del acuífero Patino (puntos densos, según Bartel y Muff (1995))

El número de pozos y la cantidad de agua que se extrae de estos en la zona de estudio, muestran que el acuífero Patiño tiene un potencial importante. Se explota el acuífero a gran escala para el abastecimiento de agua en las zonas suburbanas y también para la industria cerca de Asunción. Bartel y Muff (1995) advierten la presencia de agua salada en las zonas inferiores del acuífero principal. Esta salinización tiene su origen en la ingresión de agua salada del Bajo Chaco.

La existencia de pozos excavados de poca profundidad en parte de la zona de estudio muestra la presencia de un suelo saturado o casi saturado e indica la presencia de una zona de menor permeabilidad que forma su límite inferior. Esta capa de poca permeabilidad puede consistir de arcillas o arenas arcillosas, como comprueba la columna litológica de algunos pozos (p.e. CL-P0102), pero también puede ser formado por niveles muy compactos dentro las mismas areniscas de la Formación Patiño. Entre el acuífero superficial y el acuífero Patiño principal existe una zona seca. La profundidad hasta la zona saturada del acuífero principal varía en la zona piloto entre menos de 5 hasta más de 60 m de profundidad. Es probable que la alta densidad de población en esta área produce una contaminación ambiental en las partes superiores del acuífero.

Las mediciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea ejecutado durante el inventario por el proyecto FEHS (Molano, 2000) muestran una conductividad baja a muy baja (en general < 20 mS/m).

2.2 Pozos y perfilajes geofísicos

Un inventario de pozos ejecutado en el área de estudio por el proyecto FEHS (Molano, 2000) rindió cerca de 150 pozos profundos (>50 m). De la mayoría no existe ningún tipo de información litológica o geológica. De estos, unos 16 pozos fueron realizados por SENASA para las Juntas de Saneamiento en el área (Tabla 2-1). Estos pozos sí llevan una descripción litológica (Tabla 2-2), y la localización de estos pozos está indicado en el mapa de ubicación (Figura 2-3). En 5 de ellos fueron ejecutados perfilajes geofísicos. Hasta unos años atrás, los perfilajes geofísicos fueron hechos con un equipo de mediciones análogas. Con el tiempo, este instrumento comenzó a presentar problemas, dando registros poco confiables. Además, generalmente falta una escala a los registros eléctricos, de manera que solo pueden utilizarlos en forma cualitativa y no sirven para estimar las resistividades de las formaciones perforadas. En los últimos años se utilizó un equipo moderno, digital, pero dentro de la zona solamente existen dos registros efectuados en pozos no entubados con este instrumento (véase la Tabla 2-1).

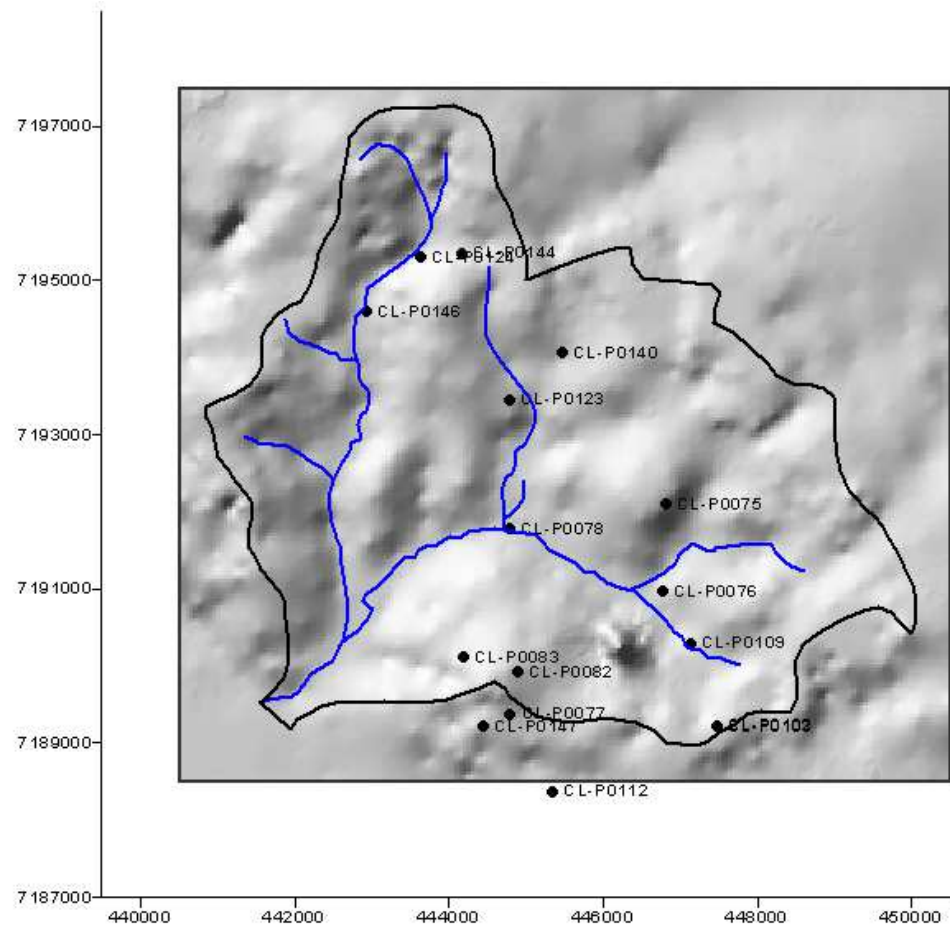


Figura 2-3: Ubicación de los pozos profundos de las Juntas de Saneamiento en la zona de estudio

Tabla 2-1: Pozos profundos en el área de estudio con información geológica

Número pozo	Localidad	Nombre local	Coordenadas		Profundidad pozo (m bajo superficie)	Nivel estático (m bajo superficie)	Perfilaje
			x	y			
CL-P0075	Ñemby	Rincon 2	446819	7192105	122	25	
CL-P0076	Ñemby	Rincon 1	446765	7190970	128	2.3	
CL-P0077	San Antonio	Cerrito P.1	444797	7189375	161		
CL-P0078	Ñemby	Ñemby P.2	444781	7191779	70	0	
CL-P0082	San Antonio	Cerrito P.4	444888	7189924	153	40	+
CL-P0083	San Antonio	Cerrito P.5	444194	7190111	152		
CL-P0102	Caaguazú	Pozo 1	447476	7189225	152	37	+
CL-P0103	Caaguazú	Pozo 2	447476	7189215	150	36	
CL-P0109	Caaguazú	Pozo 3	447125	7190298	152	0	++
CL-P0112	San Antonio	Cerrito P.3	445348	7188376	152	55	+
CL-P0123	Pai Ñu	p.1	444789	7193452	127	12	
CL-P0124	Pai Ñu	p.2A	443627	7195305	201		+
CL-P0140	Pai Ñu	p.4	445474	7194065	190		++
CL-P0144	Pai Ñu	p.3	444159	7195361	170		+
CL-P0146	Pai Ñu	pozo 2 (abandonado)	442931	7194603	134	10	+ ++ (en pozo entubado)
CL-P0147	San Antonio	Cerrito P.2	444445	7189214	152		

+ : perfilaje con equipo antiguo

++: perfilaje con equipo moderno

Tabla 2-2: La litología principal y particularidades encontrado en los pozos profundos

Número pozo	Litología principal	Particularidades
CL-P0075	Arenisca cuarzosa, grano fino a medio	A 120 m: arcilla plástica y remanentes de diabasa
CL-P0076	Arena cuarzosa, grano fino a grueso, a veces gravosa	A 125 m: ¿cantos rodados?
CL-P0077	Arenisca; intercalaciones de bandas compactas y bandas desmoronables	Hasta 15 m: arcilla arenosa Hasta 58 m: arenisca arcillosa
CL-P0078	Arena, grano fino a grueso	
CL-P0082	Arenisca cuarzosa, grano fino a grueso, grava	
CL-P0083	Arenisca; grano medio a grueso, gravilla	
CL-P0102	Arenisca, grano medio a muy grueso, a veces con cantos	A 17-21 m: arcilla A 67-70 m: basalto alterado en matriz arcillosa
CL-P0103	Arenisca con gravillas y cantos rodados	
CL-P0109	Arenisca cuarzosa, grano fino a grueso	A 150 m: conglomerado arcilloso
CL-P0112	Arenisca cuarzosa; grano fino a grueso; algunas intercalaciones de conglomerados	
CL-P0123	Arenisca cuarzosa, grano medio a grueso	Arenisca arcillosa en los primeros 50 m A 125 m: ¡vestigios de un dique ígneo!
CL-P0124	Arenisca cuarzosa, grano fino a grueso	A 12-15 m: basalto alterado A 135-140 m: arenisca arcillosa
CL-P0140	Arena, grano fino a grueso	
CL-P0144	A 15-59 m: Arcilla arenosa A 59-170 m: Arenisca fina a gruesa	
CL-P0146	Arenisca cuarzosa, grano fino a grueso	A 126 m: arcilla con cantos rodados (¿posiblemente roca intrusiva?)
CL-P0147	Arenisca cuarzosa, grano muy fino a grueso	S. Antonio/San Blas A 0-73: arenisca compacta A 73-150: arenisca friable A 150-152: conglomerado

Una conclusión de los registros litológicos es que en general las formaciones perforadas son areniscas en varios grados de compactación y variando en grano de fino a grueso. Una situación muy distinta se encontró en el pozo CL-P0140 en Pai Ñu, en el cual se perforó una capa de arcilla arenosa, prácticamente de 15 hasta 59 m de profundidad. Muestra que localmente existen estos depósitos de baja resistividad, por lo cual SEV anómalos pueden ser explicados por estos depósitos.

2.3 Estudios geofísicos anteriores

Estudios geoeléctricos locales han sido ejecutados por SENASA en Ñemby (Villalba, 1998a) y Pai Ñu (Villalba, 1998b). Se trata de in total 11 SEV, medidos en el dispositivo Wenner hasta una máxima distancia electródica de $a = 100$ a 200 m. Otro estudio fue realizado por la empresa Geoconsult S.A. (1998) para la planta de Coca Cola. Esta investigación muy local, incluye un total de 13 sondeos alrededor de la planta, hasta una distancia electródica ($L/2$) de generalmente 500 m.

3 El método de resistividad eléctrica

Los métodos de exploración geofísica (Kearey & Brooks, 1991) se aplican con el fin de obtener información del subsuelo, la cual no se puede conseguir, o solamente a un precio muy elevado, de otra manera. La información geológica más precisa se obtendría efectuando perforaciones debidamente distribuidas en la zona, de tal forma que al correlacionarlas dieron como resultado un modelo general del subsuelo. Esto en la práctica no es utilizable por los altos costos que implicaría. La geofísica entonces, permite al hidrogeólogo reducir el número de pozos exploratorios, es decir ahorrar en perforaciones. El tema de la aplicación de los métodos geofísicos a la prospección de aguas subterráneas fue ampliamente desarrollado por Astier (1971). Los métodos geofísicos más utilizados en la prospección de agua subterránea son los métodos eléctricos, y de estos el método de resistividad eléctrica o el método geoelectrico. Con el método de resistividad eléctrica se realizan sondeos eléctricos verticales (SEV). Con este método se obtiene información del subsuelo como el espesor y la composición de las capas, así como la salinidad del agua intersticial. De esta manera se puede distinguir entre capas permeables, como arenas y gravas y capas poco permeables como arcillas. También permite distinguir entre agua dulce, salobre o salada y entre aguas químicamente limpias y aguas contaminadas por sólidos disueltos. Debido a su capacidad de proporcionar información tanto de la litología como de la calidad del agua, el método SEV es el método geofísico más aplicado a las investigaciones de aguas subterráneas. Además, es un método relativamente económico, no sólo en lo referente a equipo, sino también en trabajo de campo. Se pueden cubrir grandes extensiones de terreno en un tiempo relativamente reducido y por un bajo precio.

En la presente investigación también se usó el método de resistividad eléctrica. Con este método, se introduce una corriente en el suelo y se mide el comportamiento de éste al paso de la corriente. Como en todos los métodos geofísicos, el método de resistividad eléctrica se basa en la medición de contrastes en características físicas del subsuelo. En este caso se trata de contrastes en los valores de resistividad entre diferentes unidades litológicas (p.e. entre arcillas y arenas) o entre acuíferos que contienen agua de diferente calidad (p.e. entre arenas con agua salada y arenas con agua dulce). La resistividad eléctrica de una formación está determinada por la resistividad de la roca en sí, por la resistividad del agua contenida en los espacios intersticiales y por la porosidad de la roca. A su vez la resistividad de la fase líquida depende del contenido de sales disueltas. Así, la resistividad de formación (ρ_f) es el producto de un factor de formación (F) y la resistividad del agua contenida en los espacios libres (ρ_w):

$$\rho_f = F \cdot \rho_w \quad [3-1]$$

Por esto, conociendo el valor de la resistividad de formación y de la resistividad del agua, se puede deducir el valor del factor de formación. O bien, conociendo la resistividad de formación y el factor de formación, se puede deducir la resistividad del agua. Esta relación es válida cuando se trata de sedimentos no arcillosos y cuando los valores de resistividad del agua no son muy altos. La unidad de la resistividad es el ohmio-metro (Ωm). Cada material tiene su valor característico. El factor de formación es adimensional y depende de la forma, el tamaño y la distribución de los granos. Es decir, F depende de la distribución geométrica de los poros.

Un sondeo eléctrico vertical o sondeo geoelectrico se efectúa mediante un arreglo que emplea 4 electrodos (Figura 3-1). Se emplea una fuente externa para generar una corriente que se introduce al subsuelo a través de los electrodos A y B. Esta corriente produce un campo de potenciales. La diferencia de potencial se mide entre los otros dos electrodos M y N. En general las distribuciones electródicas más utilizadas son el dispositivo Schlumberger y el dispositivo Wenner. En ambos arreglos, los electrodos se colocan en línea recta y simétricos con respecto al centro del dispositivo. En el dispositivo Schlumberger, utilizado en el presente estudio, la distancia AB siempre es mucho mas grande que la distancia MN.

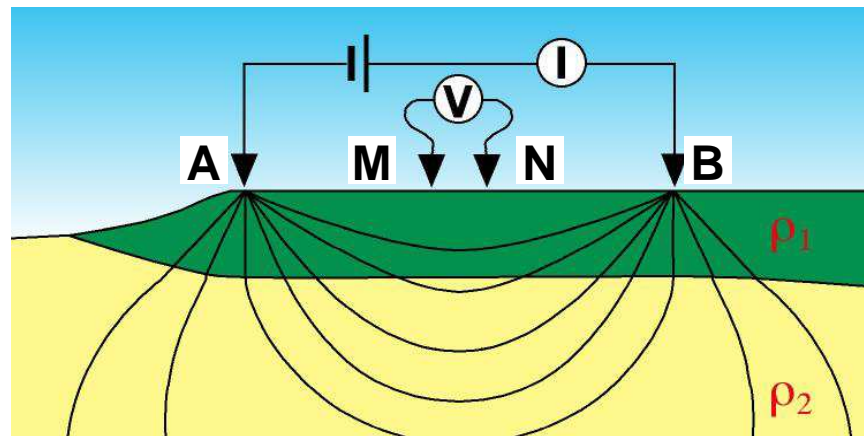


Figura 3-1: El dispositivo Schlumberger para un sondeo eléctrico vertical

En cada punto de medición se toman lecturas de la intensidad de corriente I y de la diferencia de potencial ΔV . En un sondeo Schlumberger se va aumentando simétricamente los distanciamientos entre los electrodos de corriente A y B hasta que la diferencia de potencial entre los electrodos de potencial M y N es muy pequeña y difícil de medir. En este momento los electrodos centrales se desplazan simétricamente aumentando su distanciamiento. La distancia mínima entre A y B preferiblemente es 5

veces, y nunca menos de 3 veces, la distancia entre M y N. La profundidad investigada está relacionada con la distancia de los electrodos de corriente A y B. Las lecturas de I y ΔV permiten calcular la resistencia R según la ley de Ohm:

$$\frac{\Delta V}{I} = R \quad [3-2]$$

Para un medio homogéneo, la resistividad se obtiene al multiplicar la resistencia por un coeficiente constante:

$$\rho = K.R \quad [3-3]$$

En el caso de una medición mediante 4 electrodos este coeficiente está determinado por la posición relativa de los electrodos. Para el dispositivo Schlumberger este coeficiente, llamado el coeficiente geométrico, es:

$$K = \pi \cdot \frac{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{MN}{2}\right)^2}{MN} \quad [3-4]$$

Entonces:

$$\rho = \pi \cdot \frac{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{MN}{2}\right)^2}{MN} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad [3-5]$$

En el caso de una tierra estratificada, una secuencia de capas de distintas resistividades, el valor de resistividad, obtenido para una distancia determinada entre los electrodos de corriente, está influido por los distintos horizontes atravesados por el flujo de corriente, obteniéndose así sólo valores de resistividad aparente ρ_a :

$$\rho_a = \pi \cdot \frac{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{MN}{2}\right)^2}{MN} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad [3-6]$$

En la interpretación de los sondeos, se deben deducir los valores reales de resistividad de cada capa.

Al graficar los valores de resistividad aparente contra la distancia AB/2 en ejes bilogármticos se obtiene la curva de campo del SEV. Las curvas de campo son interpretadas por comparación con curvas teóricas calculadas para modelos teóricos del subsuelo, utilizando programas de computadoras.

4 El trabajo de campo

4.1 Generalidades

Los trabajos de campo se realizaron entre el 16 de Octubre y el 15 de Noviembre de 2000. La densa población e infraestructura del área de estudio dificultaban las mediciones geoelectricas. Resultó difícil encontrar lugares para extender suficientemente un dispositivo electródico lineal; la meta era extender los electrodos hasta 640 m hacia ambos lados para alcanzar la profundidad de investigación deseada (aproximadamente 400 m). Además, la presencia de redes de electricidad, teléfono, agua, sistemas de alta tensión, una red densa de torres de comunicación formaron potenciales fuentes perturbadoras ('ruidos'), que deforman las mediciones eléctricas (Figura 4-1). Pero a pesar de estas inconvenientes, se lograron realizar un total de 50 sondeos eléctricos verticales, casi todos hasta L/2 de 640 m, de los cuales 43 sondeos son de buena o aceptable calidad.



Figura 4-1: Mediciones geoelectricas en el área piloto del acuífero Patiño

La Figura 4-2 muestra la distribución de los sondeos en el mapa topográfico de la zona piloto. Los SEV fueron medidos con el dispositivo Schlumberger. El geofísico de

SENASA fue asistido en campo por su ayudante geofísico y dos auxiliares de campo reclutados en la misma zona.

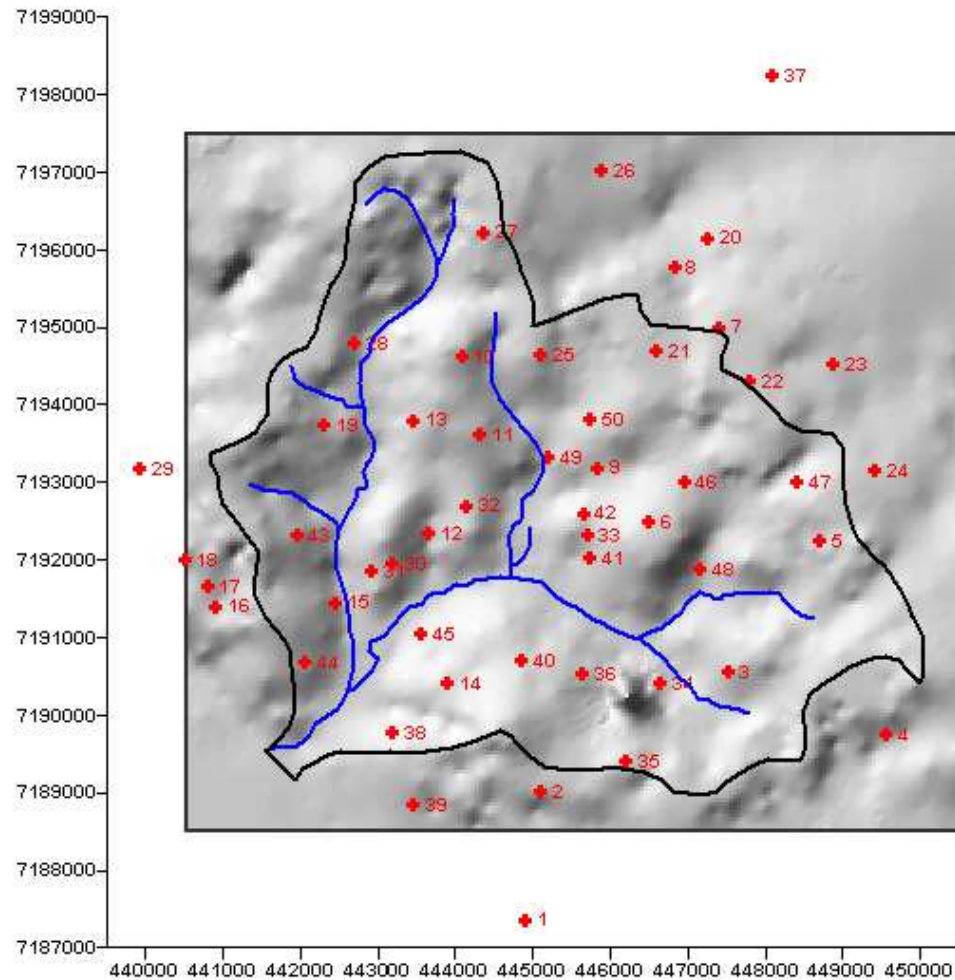


Figura 4-2: Mapa de ubicación de los SEV en la zona piloto del acuífero Patiño

Los ruidos de fuentes perturbadoras constituyeron problemas especialmente en zonas de alta resistencia del suelo, como formados por las areniscas secas de la formación Patiño. En las partes altas, a veces las altas resistencias del suelo no permitieron introducir corrientes mayores de 20 mA, con el resultado que los valores de potenciales a grandes distancias de AB/2 eran menos de 5 mV y en muchos casos menos de 1 mV, quiere decir probablemente mucho más pequeño que los valores perturbadores. Afortunadamente, las mediciones fueron hechas con un equipo moderno, el McOHM (Mark-2) de la compañía Japonesa OYO Ltd., que ofrece la posibilidad de apilamiento ('stacking') con 1, 4, 16 o 64 mediciones. Apilamiento permite mejorar notablemente

la relación Señal/Ruido. Como estándar, se aplicó un apilamiento de 4 y para las ultimas mediciones a grandes distancias AB/2 a veces se aumentó el apilamiento de 16.

4.2 Ejemplos de curvas perturbadas

Se presentan algunos ejemplos de curvas distorsionadas por distintas causas. Los sondeos geoelectricos en la Figura 4-3 son perturbados por fuentes relacionados por la infraestructura o por imperfectos en los accesorios de la instrumentación. Las curvas en la Figura 4-4 son influenciadas por causas naturales y la dificultad de cumplir con las condiciones para aplicar la técnica de sondeos eléctricos verticales, tales como la requisición de una estratificación horizontal.

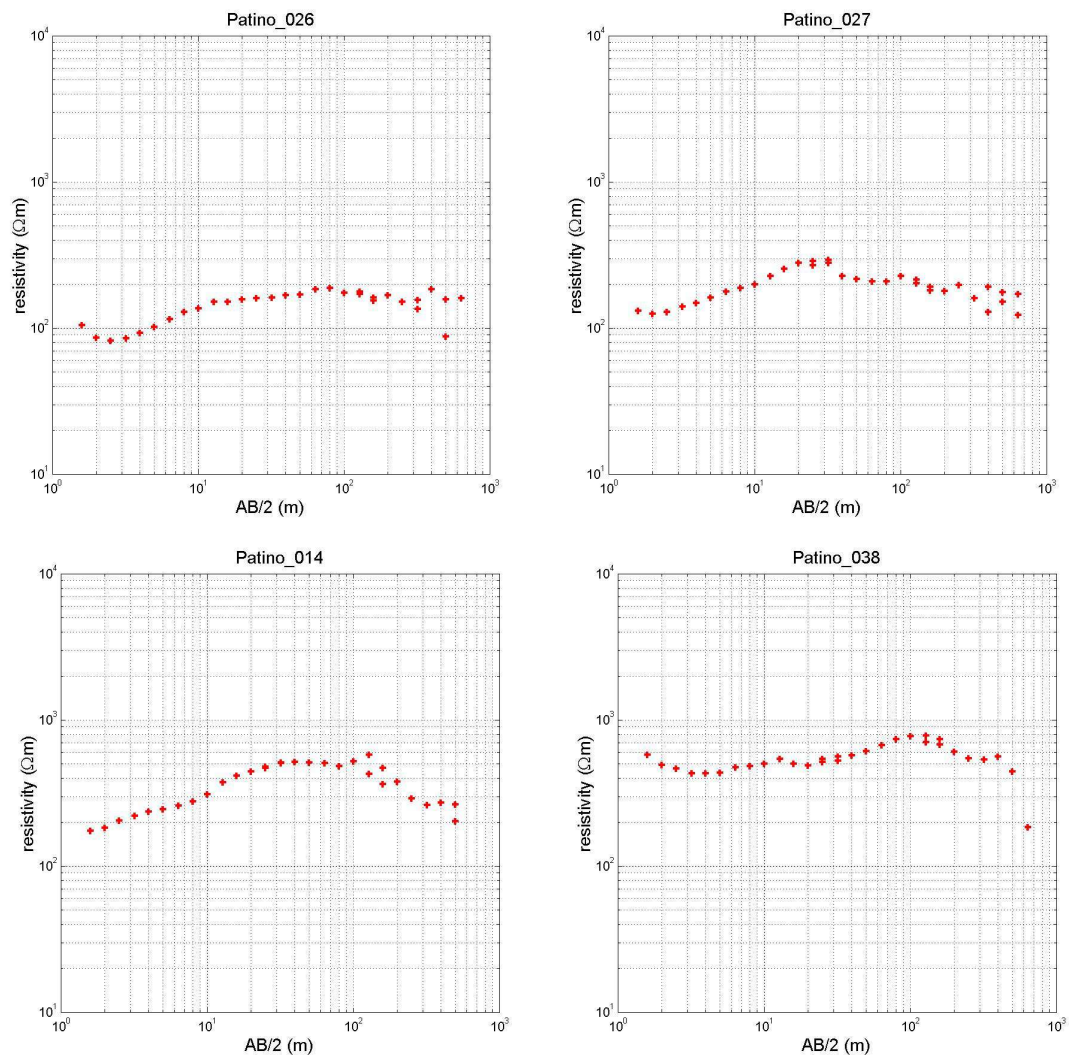


Figura 4-3: Ejemplos de sondeos perturbados por fuentes antropogéneas; arriba: inestabilidad de lectura debido a fuentes de corrientes escondidas; abajo izquierda: fuga de corriente después de lluvia; abajo derecha: línea de alta tensión

Inestabilidad de lectura

Los sondeos en la parte superior de la Figura 4-3 son ejemplos de curvas perturbadas en el norte de la zona de estudio. En ambos casos, son especialmente las partes finales de las curvas donde los puntos se dispersan. En los dos sitios, las lecturas se mostraban altamente inestables a distancias electródicas mayores de 160 m. Se repitió la medición en el lugar del SEV 27, unos días después de la primera medición. El resultado era una curva similar, igualmente perturbada debido a un campo de potenciales muy inestable a mayores distancias. En el área se encuentran un gran número de torres con emisoras. Para controlar la influencia de estos, se ejecutaron una serie de mediciones en el sitio del SEV 27 y otra en un lugar más cerca de uno de las torres, con un equipo análogo. Aunque puesto en las escalas más sensibles, ni el micro-voltímetro, ni el micro-amperímetro mostraron mayor inestabilidad. Por lo tanto, se excluye esa fuente de posibles perturbaciones como la causa de las malas mediciones. Y se concluyó que en este sector urbano, debe haber otras influencias antropogéneas a que se debe atribuir el ruido en las mediciones.

Fuga de corriente después de lluvia

A mitad de la medición del SEV 14 (Figura 4-3, abajo izquierda) estalló un tremendo aguacero, inundando la calle en que estaban extendidos los cables. Partes de los cables donde la capa aislante estaba dañada hicieron contacto con el agua, causando una fuga de corriente a partir de una distancia electródica de 300 m. Esta fuga de corriente fue comprobado, desconectando alternativamente los electrodos de corriente. Como consecuencia, el sondeo no se presta para la interpretación a partir de $L/2 = 300$ m.

Cables de alta tensión

El SEV 38 (Figura 4-3, abajo derecha) fue medido cerca y semi-paralelo a un sistema de torres y cables de alta tensión. Este sistema influyó en el sondeo, especialmente a distancias electródicas mayores, donde el dispositivo se acercaba más al sistema de alta tensión y donde las señales de la medición llegaron a valores pequeños (< 5 mV), produciendo una alta relación señal/ruido.

Inhomogeneidades laterales

Una fuente geológica de curvas distorsionadas son las inhomogeneidades laterales. Una importante inhomogeneidad lateral es el límite entre los dos sectores principales en que se puede dividir la zona de estudio (véase capítulo 5). Sondeos ejecutados cerca de este límite, pasando con los electrodos esta interfaz, resultaran influenciados por ambas estratificaciones, y como consecuencia, son distorsionados. Un ejemplo de estos sondeos es el SEV 9 (Figura 4-4, arriba izquierda), en el cual la última parte de la

curva parece primero bajar hacia una base de baja resistividad, pero luego se nivela hacia un valor arriba de los $100 \Omega\text{m}$ (para su interpretación véase la sección 6.3.3 y la Figura 6-10). Cambios laterales en la constitución geológica también se atribuye al SEV 36 (Figura 4-4, arriba derecha). Este sondeo esta ubicado muy cerca al Cerro Ñemby. Los puntos de medición son muy irregulares y no forman una curva fluente. Posiblemente el sondeo esta encima de una falla importante o sobre una zona fracturada por la intrusión de la roca ígnea. Es la única curva de la presente investigación que no ha sido interpretada. El SEV 34 (Figura 4-4, abajo izquierda) también esta influenciado por las intrusiones. La ultima parte de la curva sube fuertemente indicando la presencia de roca de alta resistividad. La pendiente de este parte, sin embargo, es mas que la máxima posible (45°) en casos de estratificación horizontal. Obviamente, una intrusión de roca ígnea no cumple esta condición.

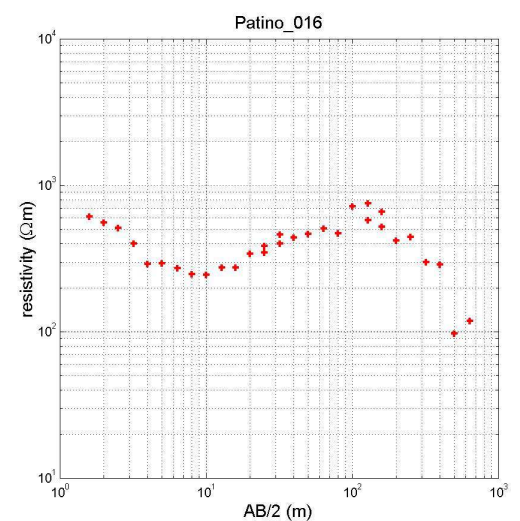
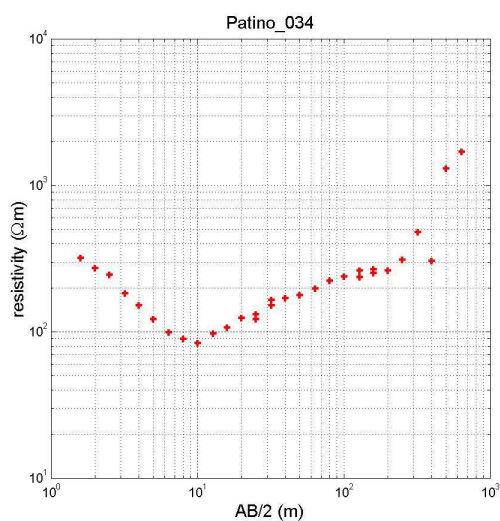
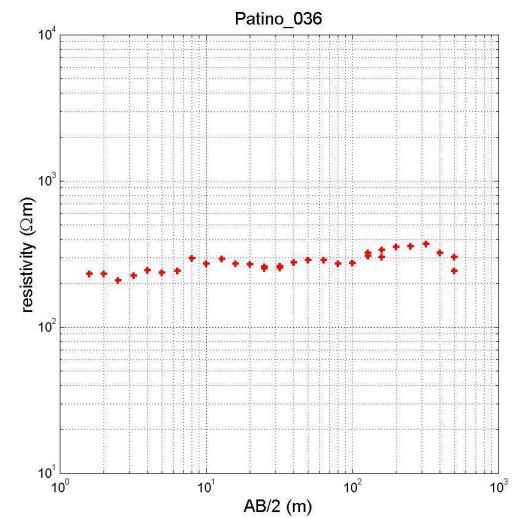
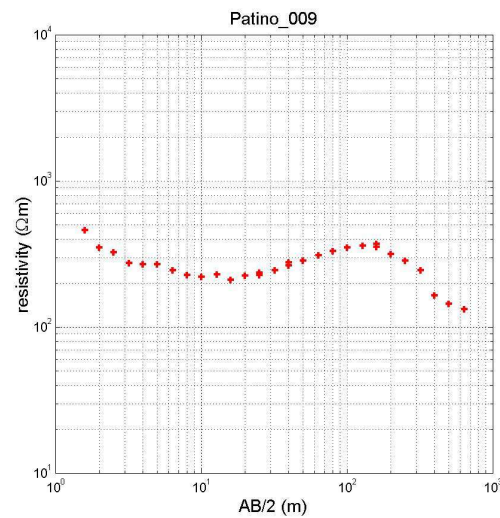


Figura 4-4: Ejemplos de sondeos perturbados por fuentes geológicas; arriba: inhomogeneidades laterales; abajo izquierda: capas no horizontales debido a inclinadas intrusiones; abajo derecha: alta resistencia de suelo

Alta resistencia de suelo

El SEV 16 (Figura 4-4) fue medido en un lugar, donde las areniscas de la Formación Patiño, que afloran aquí, son muy compactas. Era muy difícil introducir una corriente fuerte en el subsuelo, con el resultado que las señales observadas son muy pequeñas y consecuentemente la relación señal/ruido relativamente alto, produciendo puntos muy dispersos en la curva.

5 La interpretación

5.1 Empalmes

Mediciones geoeléctricas con el dispositivo Schlumberger requieren hacer empalmes en las partes donde se aumentó la distancia entre los electrodos de potencial. Como resultado de los empalmes, una curva de Schlumberger esta compuesta de varios segmentos. Si en los empalmes existen saltos grandes, como generalmente producidos por cambios laterales en el subsuelo cerca de los electrodos, deben corregir las curvas, previamente a la interpretación, por traslado vertical de uno o más segmentos (Van Overmeeren, 1991). El SEV 12 (Figura 5-1) es un ejemplo de una curva en que el segmento central fue trasladado hacia abajo sobre una distancia de 5% de un ciclo logarítmico.

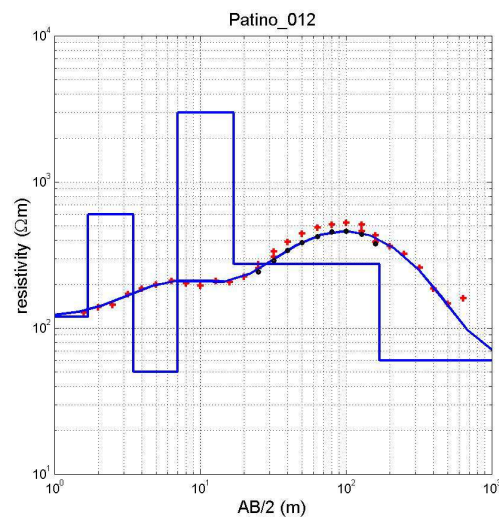


Figura 5-1: Traslado vertical del segmento central de la curva para corregir los empalmes

Casi en todos los casos en que era necesario trasladar algunos segmentos de las curvas SEV, se mantuvo el ultimo segmento de la curva y se trasladaron los segmentos anteriores. Una excepción es el SEV 19, que debe ser corregido por el salto en el empalme a 126/160 m (Figura 5-2). Si se mantiene el ultimo tramo, trasladando los primeros dos segmentos, se obtiene una interpretación en que el acuífero tiene una resistividad muy alta (550 Ωm) combinado con un espesor también grande hasta una profundidad de 320 m. Este modelo no cuadra bien ni con el resto de los sondeos en esta parte de la zona de estudio ni con el modelo regional. Si, en contrario, se dejan los

primeros dos tramos y se traslada solo el último segmento, el modelo armoniza mejor con una resistividad de $450 \Omega\text{m}$ hasta 300 m de profundidad.

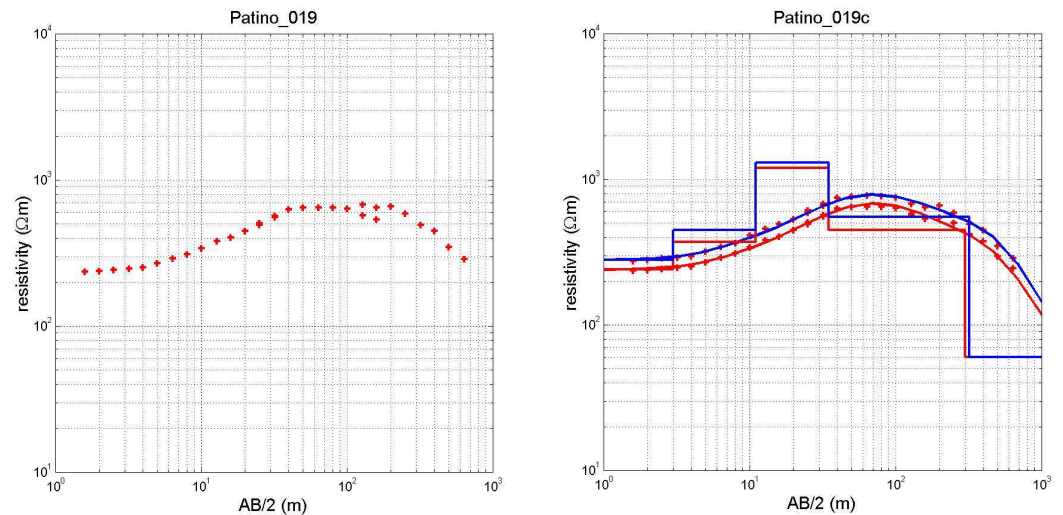


Figura 5-2: El SEV 19 con dos formas de corregir el salto en el último empalme del SEV 19; el traslado vertical del último segmento cuadra mejor en el modelo regional.

En todos los ejemplos que siguen en el texto del presente informe, se han corregido los empalmes. En el anexo A se presenta todos los SEV con los valores medidos, i.e. sin correcciones por empalmes. En la interpretación dada de estos SEV, lógicamente si se tomo en cuenta las correcciones en los casos que fueron necesarios.

5.2 El proceso interpretativo

Dentro del proceso interpretativo se sigue una metodología simple y lógica. Se inicia con una comparación cualitativa de las curvas de campo y la elaboración de mapas ubicando los diferentes tipos de curvas. A la vez se hacen mapas de iso-resistividad aparente a ciertos valores seleccionados de $AB/2$. Esta etapa puramente cualitativa se desarrolla paralela con el avance de los trabajos de campo. Con los mapas de tipos de curvas y de iso-resistividad se tiene una visión de conjunto de la zona y se da una idea de las zonas con problemas especiales, donde se quiere obtener más información. De esta manera se programan perforaciones de pozos exploratorios, se densifica el número de sondeos geoelectrónicos o se consideran otros estudios adicionales.

En la siguiente etapa se involucran los datos adicionales que se poseen y se inicia una interpretación cuantitativa en base a modelos propuestos que han sido sacados, preferiblemente, de los perfilajes eléctricos de los pozos o simplemente por conceptos

o hipótesis geológicos. En esta forma se sigue desarrollando la interpretación anotando los resultados en mapas y perfiles. Estos perfiles forman una red, que cubre toda la zona. Se chequea en los puntos de cruce de los diferentes perfiles y se controla continuamente con todos los datos hidrogeológicos existentes hasta lograr un modelo final que se ajuste a las condiciones de partida.

5.3 La interpretación cualitativa

En la interpretación cualitativa se busca distinguir los distintos tipos de curvas y zonas caracterizadas por valores altos o bajos de resistividad aparente. Esto se hace con el objeto de obtener una idea general de la zona y de dar pautas de desarrollo durante la ejecución de los sondeos. Se inicia con la elaboración de los mapas de los tipos de curvas y de iso-resistividad aparente.

5.3.1 Tipos de curvas

Una evaluación de las formas y características de las curvas de campo lleva a una división de las curvas en 4 grupos principales (Figura 5-3).

Curvas de tipo I

SEV 001 y 002 (Figura 5-3, izquierda superior) son dos ejemplos de curvas de tipo I. Este grupo de sondeos se caracteriza por un fuerte descenso en la parte final de la curva, indicando la presencia de una base de baja resistividad con valores de menos de 100 Ω m. Esta capa se encuentra a una profundidad mayor de 200 m aproximadamente. Como se puede apreciar en el ejemplo de las dos curvas, las resistividades pueden variar fuertemente en las partes superiores de las curvas. Pero el factor común es el descenso final.

Curvas de tipo II

Ejemplos del tipo II son los SEV 23 y 50 (Figura 5-3, derecha superior). Característica de este tipo de curvas es la nivelación en la última parte de la curva, indicando una base de considerable resistividad. Los valores de esta última capa varían generalmente entre 150 y 400 Ω m. Como se puede observar, esta última parte puede tanto subir o bajar ligeramente. Pero es la nivelación que marca este grupo de sondeos.

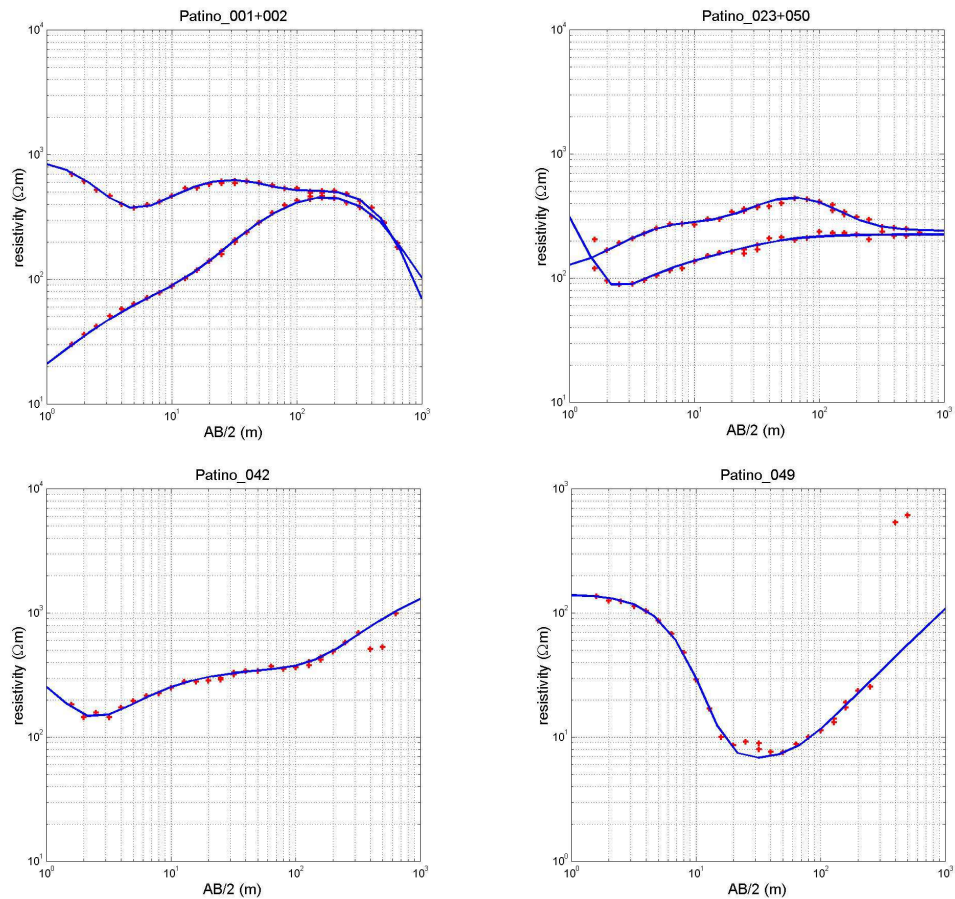


Figura 5-3: Las cuatro principales tipos de curvas

Curvas de tipo III

Este tipo de curvas, de las cuales el SEV 42 (Figura 5-3, izquierda inferior) es un ejemplo, se caracteriza por un fuerte ascenso en su ultima parte, indicando una ultima capa muy resistiva con valores de mas de 1000 Ωm .

Curvas de tipo IV

El SEV 49 (Figura 5-3, derecha inferior) es un ejemplo del cuarto tipo de curvas. Solo se han medido dos de este tipo de curvas, pero claramente forman un grupo aparte. Un fuerte descenso en el comienzo de la curva, alcanzando valores de resistividad cerca de 10 Ωm o incluso menos distinguen estas curvas de los demás. A mayor distancia eléctrica, los valores pueden volver a subir, como muestra el ejemplo, pero mediciones erráticas indican que no se cumplen las condiciones o circunstancias para efectuar sondeos eléctricos verticales. Como se explicaran mas adelante en la

interpretación, posiblemente estos sondeos son relacionados con cuerpos intrusivos, donde no se cumplen la condición de estratificación horizontal.

La distribución de los 4 tipos de curvas ha sido representada en el mapa de la Figura 5-4. En este mapa se puede observar que curvas del tipo I están en la parte Norte del área, mientras que curvas del tipo II se limitan a al parte Sur. Las curvas de los grupos III y IV quedan desperdigados por la parte Sur también.

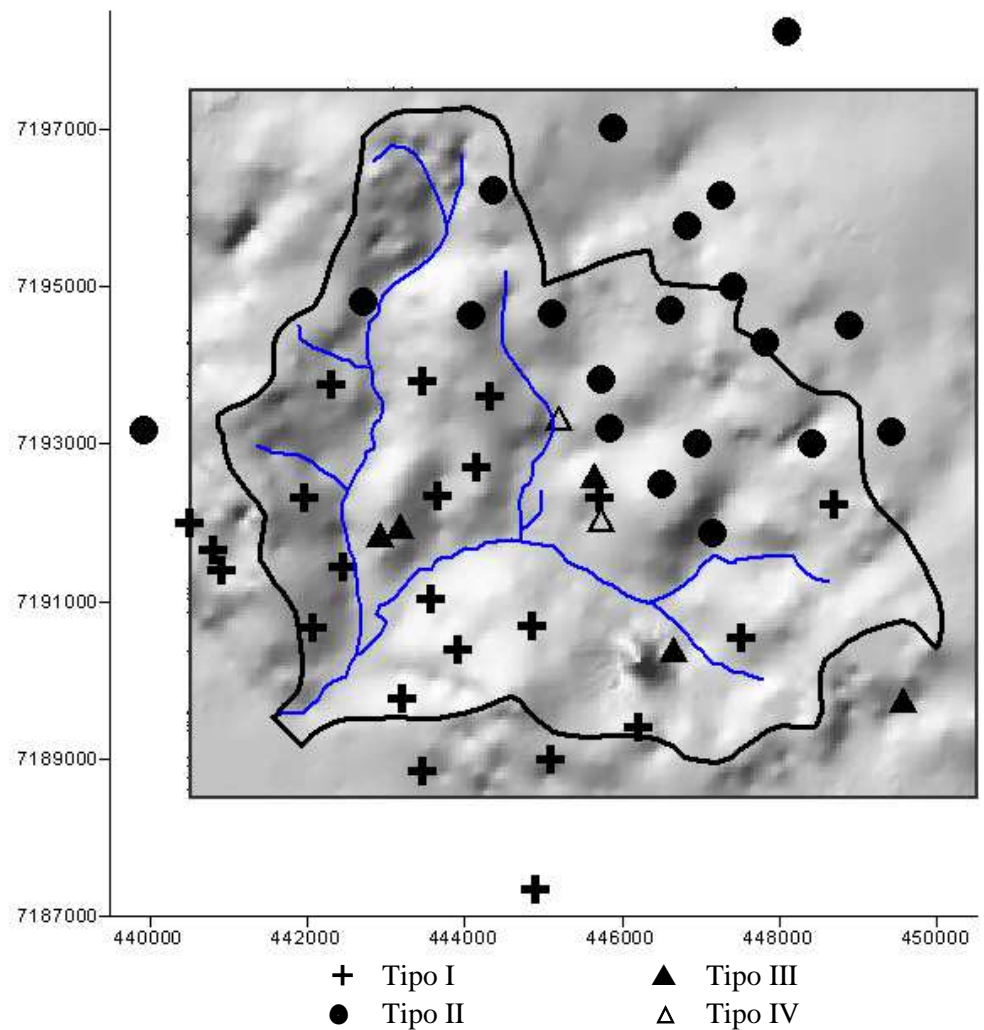


Figura 5-4: Mapa de la distribución de los cuatro grupos de tipos de curvas

5.3.2 Isoresistividades aparentes

Otros mapas preliminares y cualitativos que pueden dar valiosa información y llevar a un concepto inicial de la constitución (hidro-)geológica son los mapas de

isoresistividades aparentes. En este estudio se elaboró un mapa de isoresistividad aparente (ρ_a en Ωm) a una distancia eléctrica $AB/2 = 500$ m (Figura 5-5). El mapa delinea en forma muy clara zonas circulares o ovales de alta y muy alta resistividad aparente. La más destacada es el área cerca al cerro Ñemby, lo que conecta las altas resistividades a la intrusión de roca ígnea. Esta zona continua en dirección NNO y parece continuar aun más a una tercera zona circular de altos valores. Esto sugiere una alineación en esta dirección. Posiblemente existe una falla, a lo largo del cual en algunos puntos se distribuyen las intrusiones. Una segunda alineación parece extenderse al oeste y paralelo de la primera, sugiriendo un sistema de fallas con buzamiento NNO-SSE. Estos alineamientos de roca ígnea pueden constituir posibles barreras hidrogeológicas. Perpendicular a este sistema, las líneas de isoresistividad aparente parecen indicar otro alineamiento, el cual puede representar otro sistema de fallas.

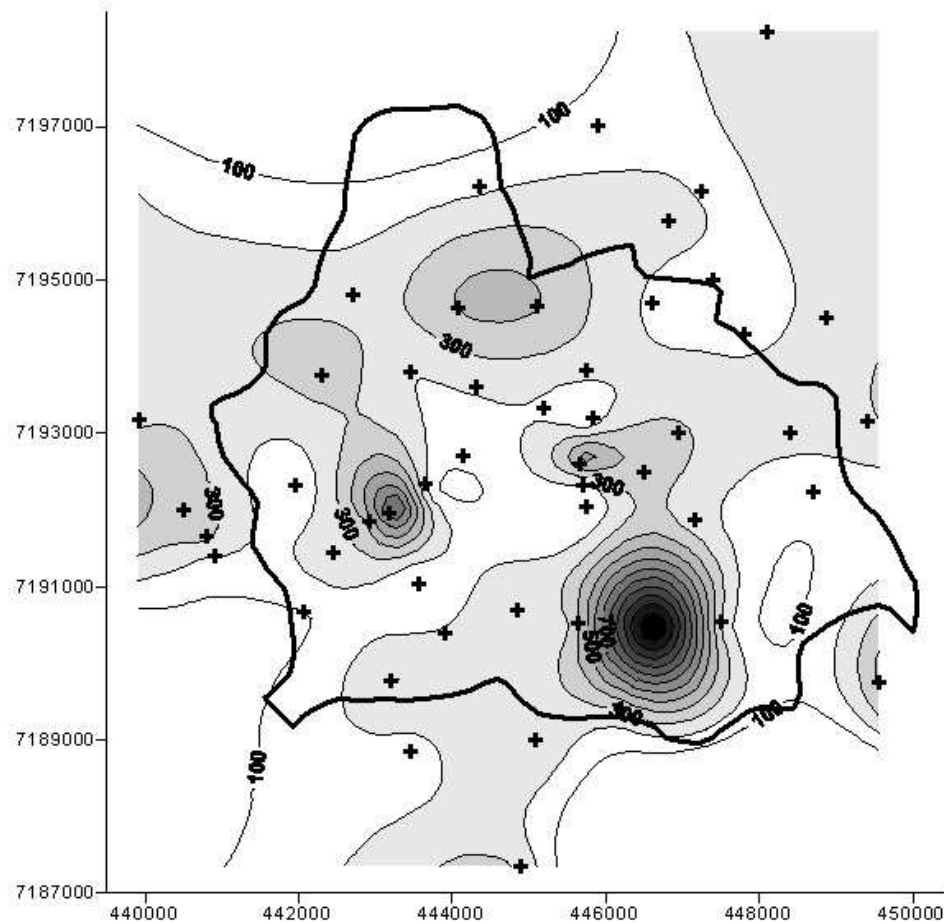


Figura 5-5: Mapa de isoresistividades aparentes (Ωm) para $AB/2 = 500$ m, destacando claramente las intrusiones de roca ígnea y sugiriendo ciertos lineamientos.

5.4 La interpretación cuantitativa

En la interpretación cuantitativa se busca modelos geoelectricos para cada uno de los grupos de tipos de curvas. Se aplica estos modelos a los sondeos de cada grupo, presentando los resultados en mapas y perfiles. En esta sección se presenta el desarrollo y la justificación de los modelos y los problemas y dudas relacionados a ellos. La descripción de los resultados, los mapas y cortes, se presenta en el capítulo 6.

5.4.1 Los modelos geoelectricos de los grupos de tipos de curvas

Grupo I

Los sondeos de Tipo I se caracterizan por la fuerte bajada en la ultima parte de la curva. La Tabla 5-1 presenta el modelo geoelectrico de estas curvas SEV. Varios SEV permiten observar, debajo de las capas superiores, las dos partes de la arenisca: la parte seca con altas resistividades nivelando hacia una parte saturada con resistividad menos alta. La nivelación en el SEV 1 es un ejemplo. Debajo del acuífero se encuentra la base con una resistividad de 30 – 60 Ω m. Curvas de este tipo se encuentran en la parte meridional de la zona de estudio.

Tabla 5-1: El modelo geoelectrico para curvas SEV del tipo I.

Capa No.	Capa	Rango de resistividad	Particularidades
1a,b, c, etc.	Superficial	Resistividad variada	
2	Acuífero seco	Resistividad muy alta (generalmente >1000 Ω m)	Arenisca en diferente grado de compactación
3	Acuífero saturado	Resistividad alta (generalmente 200-500 Ω m)	Arenisca en diferente grado de compactación
4	Base del acuífero	Resistividad baja (30-60 Ω m)	Formación arcillosa o agua salobre/salada

Algunos SEV permiten deducir un modelo mas detallada. Una minuciosa observación del SEV 1 (Figura 5-6), con un empalme preciso de los distintos segmentos, indica una ligera inflexión en la zona entre $L/2 = 100$ y 200 m. Esta inflexión se puede interpretar por la presencia de una zona de tamaño de grano mas fino, posiblemente arcillosa dentro del acuífero. Un modelo con una capa de baja resistividad (125 Ω m) entre 30 y 35 m de profundidad claramente mejora la conformidad entre las mediciones y la curva modelo. En el sitio del sondeo, no hay evidencia para una semejante capa. Pero en general, los pozos excavados de poca profundidad dan indicios de la existencia de un acuífero somero y en general de la presencia de capas menos permeables en general. Mientras que algunos pozos tabulares profundos con registros gamma, por ejemplo entre 100 y 110 m del pozo P3 en Caaguazu (vease la Figura 5-14) también indican zonas de mayor radiación gamma, pruebas de zonas de sedimentos mas finos y arcillosos.

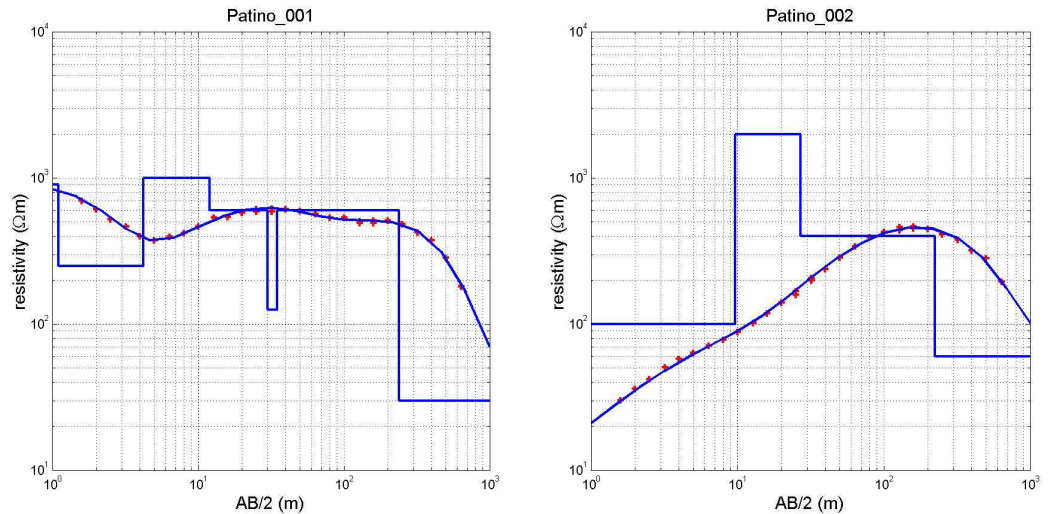


Figura 5-6: El modelo geoelectrico del grupo I; con adicionalmente una capa menos permeable para SEV 1.

Otra anomalía del SEV 1 es el valor muy alto ($600 \Omega\text{m}$) de la resistividad del acuífero, comparándolo con los valores comunes para la formación Patiño (200 a $400 \Omega\text{m}$). Cerca de este sondeo aflora la Formación Patiño. Sin embargo, las areniscas en este lugar son muy compactas y en parte re-cristalizadas bajo la influencia de metamorfismo de contacto, como ha ocurrido en varios sitios en la zona de estudio por intrusión de roca ígnea.

Grupo II

Curvas de este tipo se encuentran en la parte septentrional de la zona de estudio. Las curvas son caracterizadas por la nivelación hacia valores típicos del acuífero Patiño en la parte final de la curva. No hay indicios de capas subyacentes con mayor o menor resistividad. La Tabla 5-2 presenta el modelo geoelectrico de estas curvas SEV. Observa que la única diferencia con los SEV del grupo I es la falta de una capa base de baja resistividad.

Tabla 5-2: El modelo geoelectrico para curvas SEV del tipo II.

Capa No.	Capa	Rango de resistividad	Particularidades
1a,b, c, etc.	Superficial	Resistividad variada	
2	Acuífero seco	Resistividad muy alta (generalmente $>1000 \Omega\text{m}$)	Arenisca en diferente grado de compactación
3	Acuífero saturado	Resistividad alta (generalmente $200-500 \Omega\text{m}$)	Arenisca en diferente grado de compactación

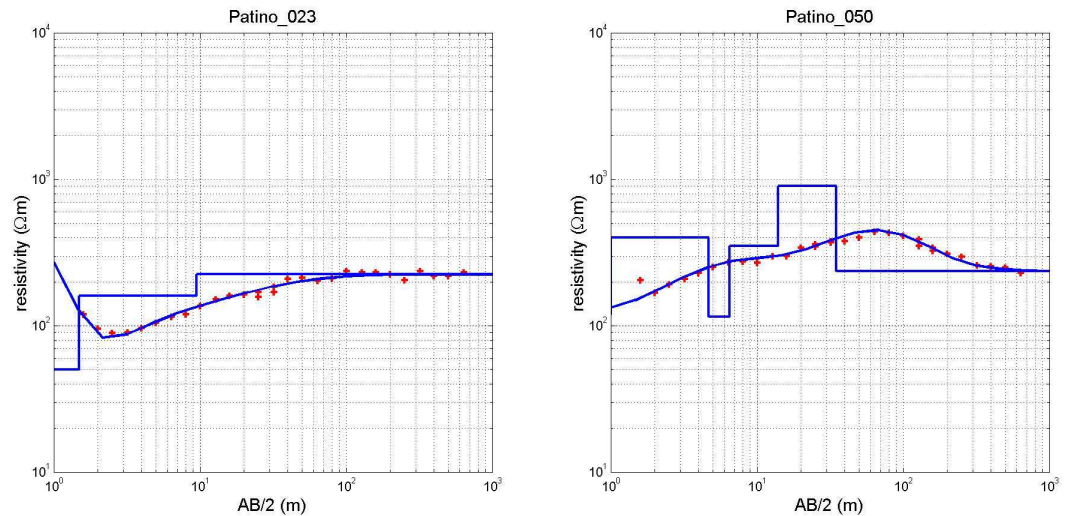


Figura 5-7: El modelo geoelectrico del grupo II

Una particularidad del SEV 23 (Figura 5-7, izquierda) es la falta de una capa de muy alta resistividad, indicando la arenisca seca. Debajo de los estratos superiores comienza a una profundidad de 9.7 m el acuífero Patiño con su resistividad de $225 \Omega\text{m}$. La resistividad del acuífero en el lugar del SEV 50 (Figura 5-7, derecha) tiene un valor similar ($235 \Omega\text{m}$), pero se distingue por la presencia de la arenisca no saturada con una resistividad de $900 \Omega\text{m}$. A una profundidad de 5 m se encuentra una delgada capa con una resistividad relativamente baja, que puede indicar una capa poca permeable, que puede sostener un acuífero somero. Curvas del grupo II se encuentran en la parte septentrional del área de estudio.

Grupo III

Este tipo de curvas se caracteriza por altas resistividades de la ultima capa, lo cual generalmente se expresa en la curva por un ascenso en la parte final. Los valores de esta ultima capa son mayores de $1000 \Omega\text{m}$. La Tabla 5-3 presenta el modelo

geoelectrico de estas curvas SEV. Observa que la única diferencia con los SEV del grupo I y II es la última capa de alta resistividad.

Tabla 5-3: El modelo geoelectrico para curvas SEV del tipo III.

Capa No.	Capa	Rango de resistividad	Particularidades
1a,b, c, etc.	Superficial	Resistividad variada	La parte superior puede ser formado por varias capas
2	Acuífero seco	Resistividad muy alta (generalmente $>1000 \Omega\text{m}$)	Arenisca en diferente grado de compactación
3	Acuífero saturado	Resistividad alta (generalmente $200-500 \Omega\text{m}$)	Arenisca en diferente grado de compactación
4	Basamento	Resistividad muy alta (generalmente $> 1000 \Omega\text{m}$)	Roca ígnea intrusiva o extrusiva o meta-areniscas metamórfica

En el ejemplo de este grupo, SEV 42 (Figura 5-8) falta una capa de muy alta resistividad representando el acuífero seco. Este se debe probablemente a la baja posición geográfica del sitio de este sondeo. El sondeo muestra, similar a los grupos anteriores, el acuífero saturado e indica claramente el valor de su resistividad ($350 \Omega\text{m}$) por la nivelación en la parte central de la curva. Difiere notoriamente de los grupos anteriores por la fuerte pendiente de la cola de la curva, la cual es característica de este tipo de curvas.

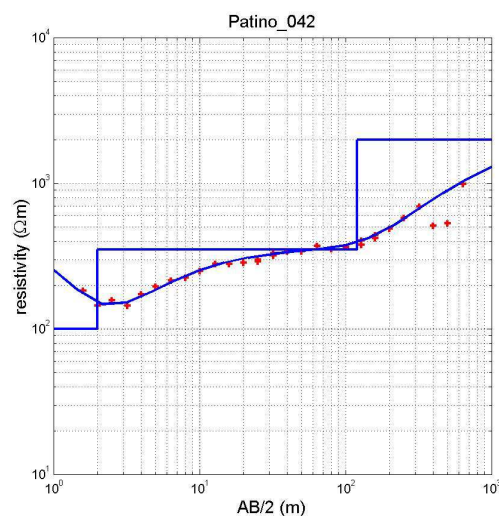


Figura 5-8: El modelo geoelectrico del grupo III

Grupo IV

Este tipo de curvas difiere fuertemente de los tres grupos anteriores, y solo representa a dos SEV medidos en el área de estudio. Las curvas son caracterizadas por un descenso

fuerte en la primera parte de la curva, llegando a valores muy bajas (en un caso $6.2 \Omega\text{m}$). La naturaleza de la fuente de esta baja resistividad del subsuelo no se conoce. Valores de resistividad muy bajas son producidos por arcillas o por sedimentos con agua salada o contaminada. Los dos SEV de este grupo se ubican muy cerca de sondeos eléctricos del grupo III, o sea cerca de sondeos que indican intrusiones de roca ígnea. Expertos geólogos de SENASA han sugerido que las bajas resistividad se podrían contribuir a diques o filones de sulfuros metalíferos, cuyas resistividades también pueden ser muy bajas (comunicación personal). En la parte de la interpretación se vuelve a referir a estos sondeos. La Tabla 5-4 presenta el modelo geoelectrico de estas curvas SEV.

Tabla 5-4: El modelo geoelectrico para curvas SEV del tipo IV

Capa No.	Capa	Rango de resistividad	Particularidades
1 a,b, c, etc.	Superficial	Resistividad variada	
2	Formación desconocida	Resistividad muy baja ($5-15 \Omega\text{m}$)	Posiblemente filones metalíferos
3 a, b	Formaciones desconocidas	Resistividad mas alta	Con mediciones dispersas y erráticas

En el ejemplo de este grupo, SEV 49 (Figura 5-9) la capa de resistividad extremadamente baja ($6.2 \Omega\text{m}$) se extiende hasta una profundidad mínima de 55 m. Por debajo suben las resistividades. Se puede ajustar la curva con un modelo con la ultima capa de $200 \Omega\text{m}$, que podría representar el acuífero Patiño. Sin embargo, a mayor distancia $L/2$ se midieron valores muy altos. Estos puntos son dispersos y erráticos, pero pueden indicar por sus altos valores la presencia de roca ígnea a mayor profundidad. El modelo correspondiente con una capa con una resistividad que representa roca ígnea ($2000 \Omega\text{m}$) es, en la parte de las mediciones consistentes (hasta $L/2 = 128 \text{ m}$), equivalente al modelo anterior.

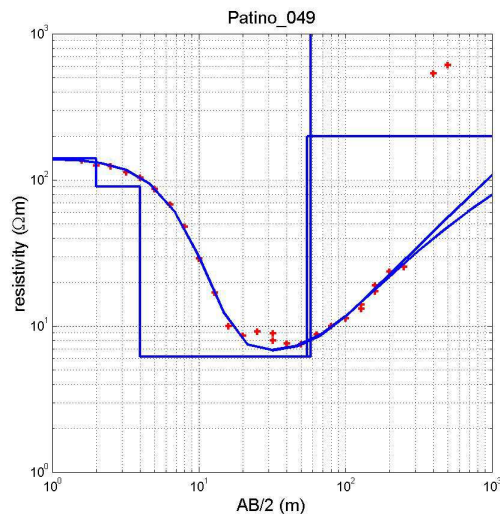


Figura 5-9: El modelo geoelectrico del grupo IV

Como explicación para este tipo de curvas, se han sugerido la influencia de depósitos sulfúricos metalíferos. Y la influencia de intrusiones de roca ígnea parece muy plausible, ya que la ubicación del SEV 49 esta entre el pozo CL-P0123 y el SEV 42, ambos con indicaciones de intrusivos. La descripción litológica del pozo menciona ‘vestigios de un dique ígneo’ a una profundidad de 125 m. El SEV 42 pertenece al grupo III e indica claramente roca altamente resistiva en su parte inferior. Sin embargo, no solamente filones metalíferos, sulfúricos pueden causar bajas resistividades. El pozo CL-P0144 tiene 44 m de arcillas (arenosas) cerca de la superficie. Falta información adicional para poder suponer con mayor certeza la naturaleza de estas capas de muy baja resistividad.

En base de esta subdivisión en grupos de tipo de curvas se interpretaron todos los sondeos geoelectricos de la zona. Los sondeos y la interpretación de cada uno han sido recopilados en el anexo 1.

5.4.2 Equivalencia

Dos factores importantes limitan la resolución y dificultan en la practica la interpretación de sondeos eléctricos: equivalencia y supresión. Equivalencia significa que existen varios modelos que producen curvas prácticamente idénticas. Es decir, no existe una solución única para una curva geoelectrica. Supresión significa que una capa que tiene poco espesor con respecto a su profundidad, en general no aparece en la forma de la curva. Desde luego, el grado de supresión depende también de los contrastes en resistividades entre las capas. Debajo se presenta algunos ejemplos de equivalencia en las curvas SEV medidos en la zona piloto del acuífero Patiño.

Con un mayor número de capas, el número de soluciones equivalentes de una curva SEV aumenta. El SEV 10 (Figura 5-10, izquierda) en la zona de estudio parece prácticamente una curva de 2 capas, permitiendo una solución única.

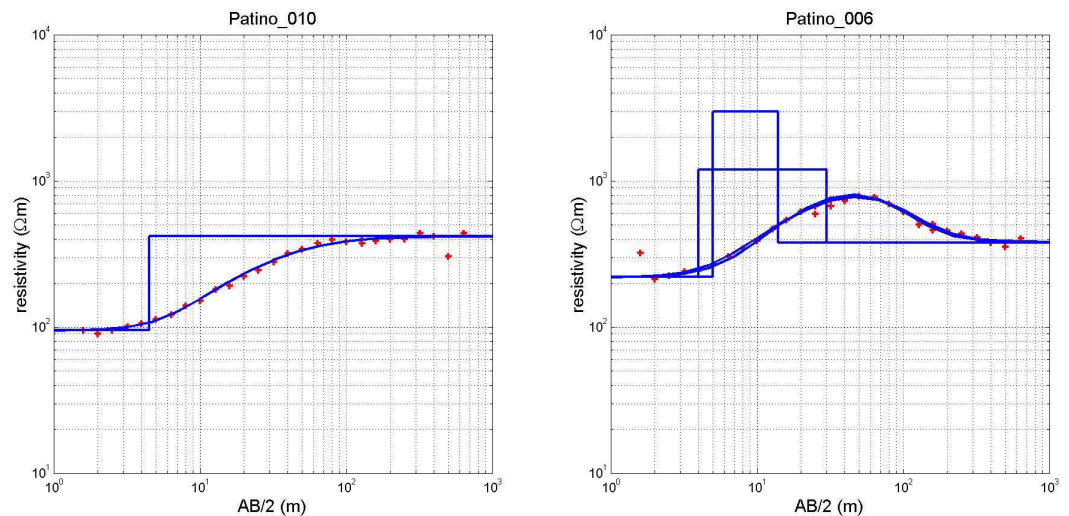


Figura 5-10: Ejemplos de curvas simples en la zona de estudio; izquierda: una curva de 2 capas; derecha: una curva de 3 capas con dos soluciones equivalentes.

El SEV 6 (Figura 5-10, derecha) parece una curva de 3 capas, si se descarta el primer punto de medición. Mientras que se deducen directamente las resistividades de la primera y de la última capa, la resistividad y el espesor de la capa intermedia no están definidas por equivalencia. En el ejemplo se presenta dos de las posibles soluciones. Una capa con resistividad de $3000 \Omega\text{m}$ con un espesor de 9 m produce prácticamente la misma curva modelo como una capa con resistividad de $1200 \Omega\text{m}$ con un espesor de 26 m. Si la interfaz entre la segunda y la tercera capa representa el límite entre la arenisca seca y la arenisca saturada, es obvio que el nivel del agua no se puede deducir con certeza de un SEV de más de dos capas. Las dos soluciones de la interpretación del SEV 6 muestran que el nivel del agua puede estar a una profundidad tanto de 14 m como de 30 m. Solo información independiente adicional puede hacer llegar a la interpretación correcta de esta curva. En este caso, se puede solucionar si se dispone de un mapa de niveles de agua, como por ejemplo compilado de un inventario de pozos. La nivelación de los puntos de medir hacia el final de la curva, sí indica con certidumbre la resistividad del acuífero Patiño en este lugar ($380 \Omega\text{m}$).

Generalmente, sin embargo, las curvas SEV del área de estudio manifiestan más de 3 capas, así ampliando el número de soluciones equivalentes. Un ejemplo es el SEV 13 (Figura 5-11, izquierda) con un mínimo de 5 capas (línea continua). En esta curva, el acuífero saturado con agua está bien reflejado por la nivelación de la curva antes la

bajada final. Arriba del acuífero se encuentra una zona seca expresado por la fuerte pendiente en la parte superior de la curva.

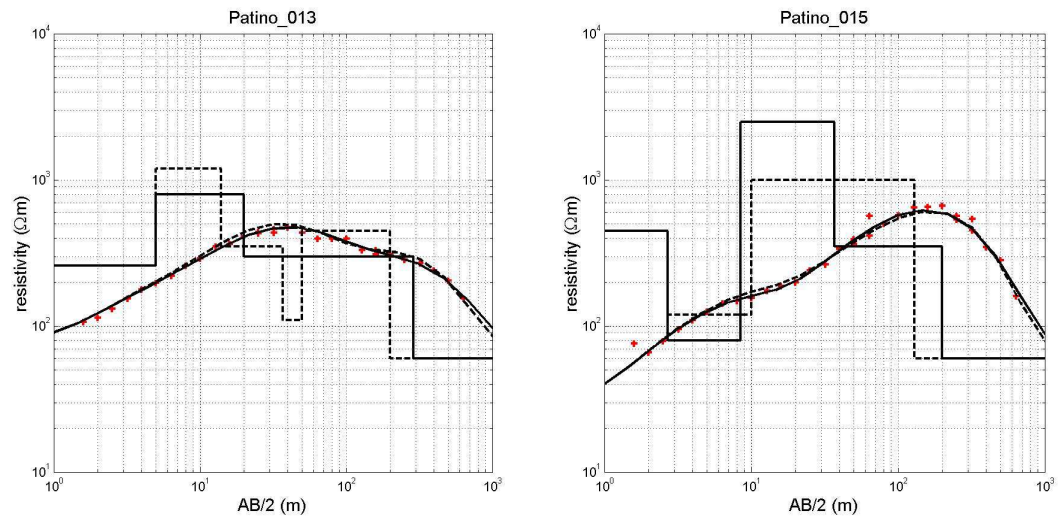


Figura 5-11: Ejemplos de equivalencia en curvas en la zona de estudio y de solucionar este problema con conceptos hidrogeológicos consistentes

Sin embargo, el modelo de línea continua no es la única solución de la curva. Un modelo alternativo puede resultar al interpretar la inflexión de la curva como la expresión de una capa fina o arcillosa de baja resistividad (línea discontinua). Esta capa dividiría el acuífero en dos partes y cambia su espesor. El modelo equivalente en la figura tiene su base en 200 m, en vez de los 290 m del modelo anterior (línea continua). Nuevamente, el SEV no da ninguna clave cuanto a la solución correcta y se necesita información adicional para resolver el problema de equivalencia. Pero, no obstante la equivalencia, la curva sí refleja directamente la presencia del acuífero.

Esto no siempre es el caso con los sondeos realizados en el área de estudio, muestra el SEV 15 (Figura 5-11, derecha). La subida final de la curva, se puede interpretar como una sola capa de alta resistividad: el modelo de línea discontinua con una resistividad de 1000 Ωm . Sin embargo, este modelo no cabe bien dentro un concepto lógico de la constitución hidrogeológica de la zona. Una solución más probable esta dada por el modelo de línea continua en que las altas resistividades han sido contribuidas a dos formaciones: la zona seca superior con muy altas resistividades (2500 Ωm) y la zona inferior, cuyo valor de resistividad de 350 Ωm concuerda mucho mas con los valores del acuífero saturado deducidos de otras curvas. Es un ejemplo de tratar equivalencia con conceptos hidrogeológicos, muy útil en casos de ausencia de información adicional de pozos.

Otro ejemplo de equivalencia y la forma de tratarlo es el SEV 45, un sondeo de muy buena calidad (Figura 5-12). La interpretación más simple, indicado por el modelo y la curva de línea discontinua, consiste de 5 capas. En este modelo, existe una capa seca con muy alta resistividad ($2000 \Omega\text{m}$) a una profundidad de 28 a 38 m. Este profundidad parece demasiado en el lugar específico. Un modelo alternativo (modelo de línea continua) incluye una capa mas, de baja resistividad ($100 \Omega\text{m}$), así permitiendo incluir la capa seca a mucho menos profundidad (de 16 a 27 m). La capa de baja resistividad puede ser una zona más arcillosa o un acuífero más somero, sostenido por una capa poco permeable compuesto por arenisca compacta o arcillosa.

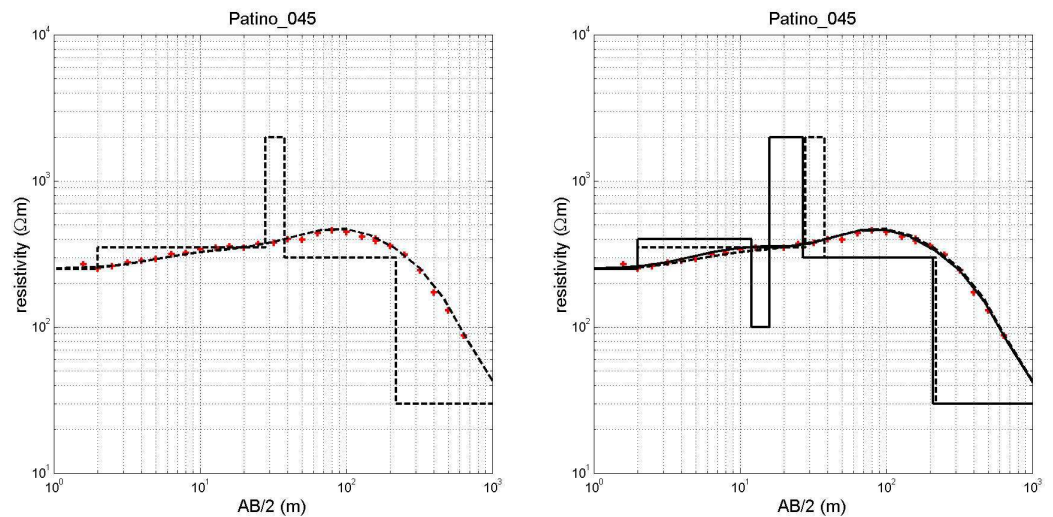


Figura 5-12: Ejemplo de equivalencia en el SEV 45 y de solucionar este problema con conceptos hidrogeológicos consistentes

Estas dos limitaciones se pueden obviar coleccionando la mayor cantidad de datos adicionales de la zona, tales como geología, registros litológicos y perfilajes geofísicos de pozos, análisis químicos de agua, especialmente el contenido de sales disueltas y valores de conductividad. A mayor cantidad de datos adicionales, más se puede reducir el número de soluciones posibles.

5.4.3 Información adicional de pozos y perfilajes

La información adicional más valiosa para la interpretación de sondeos geoelectricos son los perfilajes efectuados en pozos. En estos perfilajes, las mediciones LN ('Normal Larga') representan las resistividades reales de las capas perforadas. Las mediciones SN ('Normal Corta'), SP (Potencial Espontáneo) y radiación gamma natural suministran las interfaces entre las formaciones y toda estos registros juntos proveen

información sobre la composición de las rocas y el agua. Las resistividades y espesores deducidos de los perfilajes sirven para confirmar la interpretación de los SEV cercanos y se prestan de parámetros para los modelos del SEV, así limitando el número de soluciones equivalentes en la interpretación de ellos.

Como explicado anteriormente (véase sección 2.2), solo existen dos perfilajes geofísicos en la zona de estudio, ejecutados con un instrumento moderno digital, registrando los registros eléctricos LN y SN en escalas adecuadas. Estos perfilajes son de los pozos CL-PO109 y CL-PO140 (Figura 5-13). A continuación, se describe la relación entre estos registros eléctricos y los sondeos de superficie cercanos.

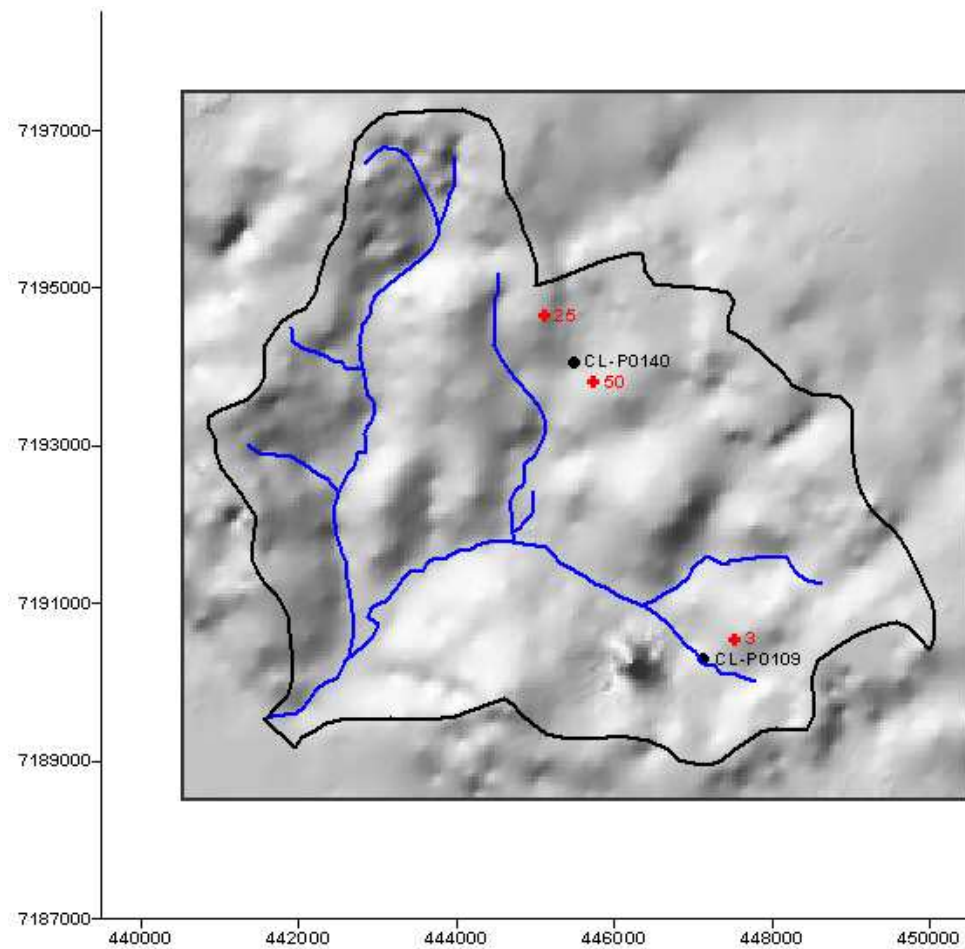


Figura 5-13: Mapa de la ubicación de los dos pozos con perfilaje eléctrico que sirve para el modelo geoelectrico de sondeos eléctricos verticales en la cercanía de los pozos.

Pozo CL-P0109 (Caaguazu)

Un ejemplo es el perfilaje del pozo CL-P0109 en Caaguazu. La parte superior del registro LN, hasta una profundidad de 100 m, tiene una resistividad promedio de aproximadamente 375 Ωm (la escala es de 0 a 1000 Ωm). De 100 a 110 m hay una delgada capa de material fina, arcillosa y a mayor profundidad las resistividades aumentan nuevamente a valores más altos. El SEV 3 fue realizado a unos 400 m del pozo. La resistividad del acuífero, interpretada del sondeo, es 350 Ωm , lo cual concuerda bien con el registro LN. El espesor de la capa arcillosa (<10 m) en relación a su profundidad no justifica incluirlo en el modelo geoelectrico.

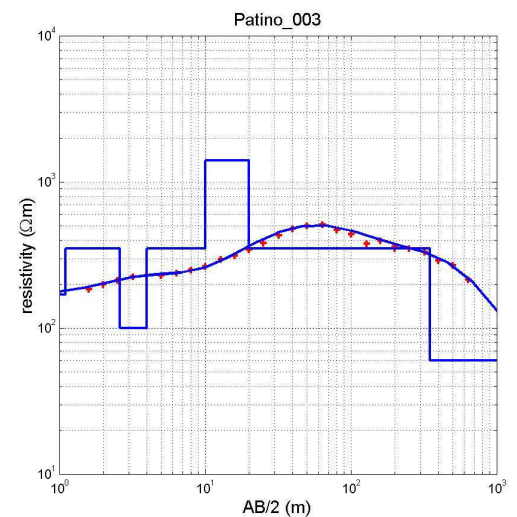
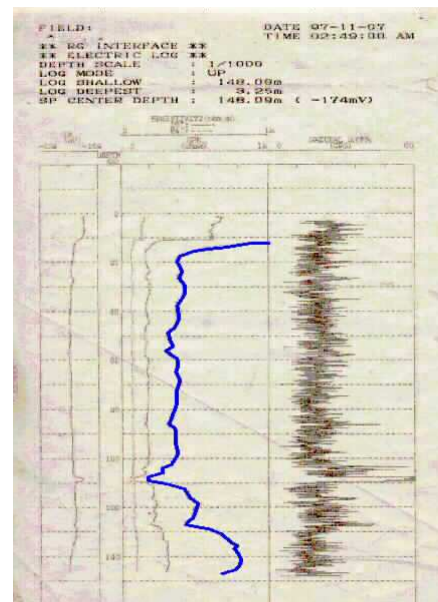


Figura 5-14: Perfilaje del pozo P3 en Caaguazu (CL-P0109) y SEV 3 efectuado en la cercanía del pozo; el registro LN ha sido acentuado con una línea gruesa.

Pozo CL-P0140 (P4 en Pai Ñu)

Otro perfilaje existe del pozo CL-P0140 en Pai Ñu (Figura 5-15). El registro LN, que representa la resistividad real del subsuelo esta acentuado con una línea azul. La escala del gráfico es de 0 a 500 Ωm . Se observa una variación considerable con la profundidad. Esta variación generalmente no esta reflejada en el registro gamma, por lo cual se puede concluir que no se debe a zonas arcillosas. Probablemente se debe atribuir las variaciones a zonas de diferente compactación, diagenesis o metamorfismo. El promedio de los diferentes sectores del registro varía entre 250 y 375 Ωm .

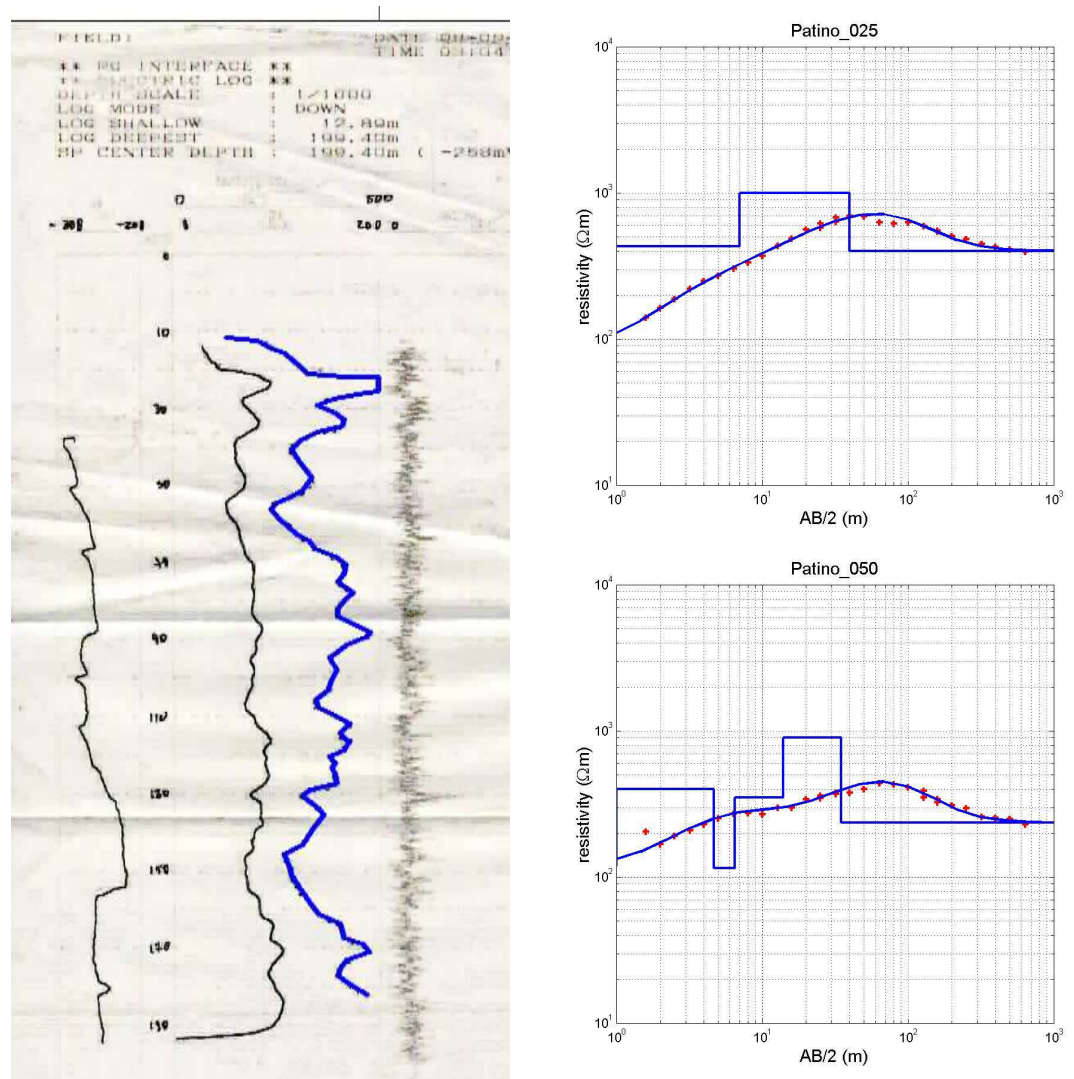


Figura 5-15: Perfilaje del pozo 43 en Pai Ñu (CL-P0140) y los SEV 25 y 50 efectuados en la cercanía del pozo; el registro LN ha sido acentuado con una línea gruesa.

Obviamente, la resistividad de la Formación Patiño varía también lateralmente, debido a estos efectos. Eso se puede observar en los dos sondeos, realizados cerca del pozo (Figura 5-15). Ambos sondeos indican claramente el valor del acuífero; el SEV 25 da una resistividad de 400 Ωm, mientras que el SEV 50 marca 235 Ωm.

5.4.4 Algunos casos especiales

SEV 6: final de la curva

SEV 6 es un ejemplo de una curva en que la ultima capa no está bien definida (Figura 5-16). Si se descarte el último punto medido, la curva parece descender. Si se incluye el último punto, nivelación hacia una resistividad de aproximadamente $400 \Omega\text{m}$ es más probable. Cuando uno considera la profundidad de la interfaz en el primer modelo, hay que concluir que llega a una profundidad que parece demasiado grande (450 m).

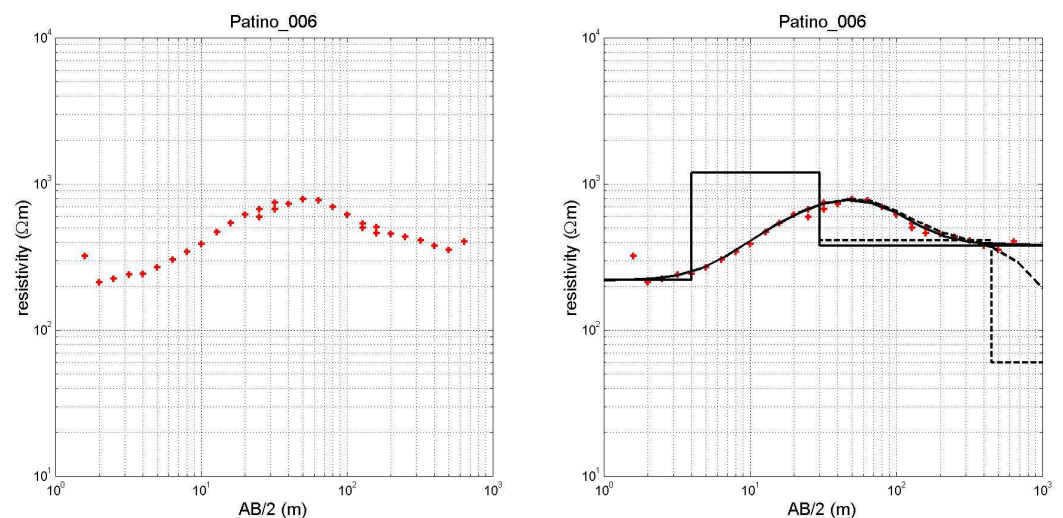


Figura 5-16: SEV con dudas sobre a interpretación de la ultima capa; izquierda: los puntos medidos; derecha: los dos modelos

Una explicación por el comportamiento dudoso de la curva esta dada por su ubicación. El sondeo fue ejecutado cerca al limite entre las dos regiones principales que divide el área de estudio. SEV 6 esta probablemente dentro de la zona sin una base conductiva, pero al extender los electrodos a grandes distancias mayor de 500 m, el efecto de la zona vecina viene visible en al curva. En base a esta suposición, se interpretó la curva sin la base conductiva.

SEV 31: equivalencia y la significación geológica

El SEV 31 (Figura 5-17) esta ubicado cerca de la confluencia de los arroyos Mbocayaty y Ñemby. Se encuentra entre los SEV 15 y 31 de características bien distintas. La interpretación inicial del SEV 31 esta dada por el modelo de línea discontinua (Figura 5-17, arriba izquierda), que incluye una capa de $600 \Omega\text{m}$ entre una profundidad de 28 y 275 m. Este valor puede representar la arenisca de la Formación Patiño, pero como pueden observar en el mapa de las resistividades de esta formación (véase capítulo 6) este valor es más alto que los valores normalmente deducido para

esta arenisca. Una explicación podría ser que se trata de una meta-arenisca, afectada por una intrusión. La presencia de una intrusión se ha deducida del sondeo vecino, el SEV 30, el cual indica en su ultima parte una resistividad alta, de 800 Ωm . Esto lleva a un modelo equivalente para la interpretación del SEV 31, incluyendo en este modelo también una capa de 800 Ωm (Figura 5-17, arriba derecha, modelo de línea continua). Como pueden observar los dos modelos son equivalentes.

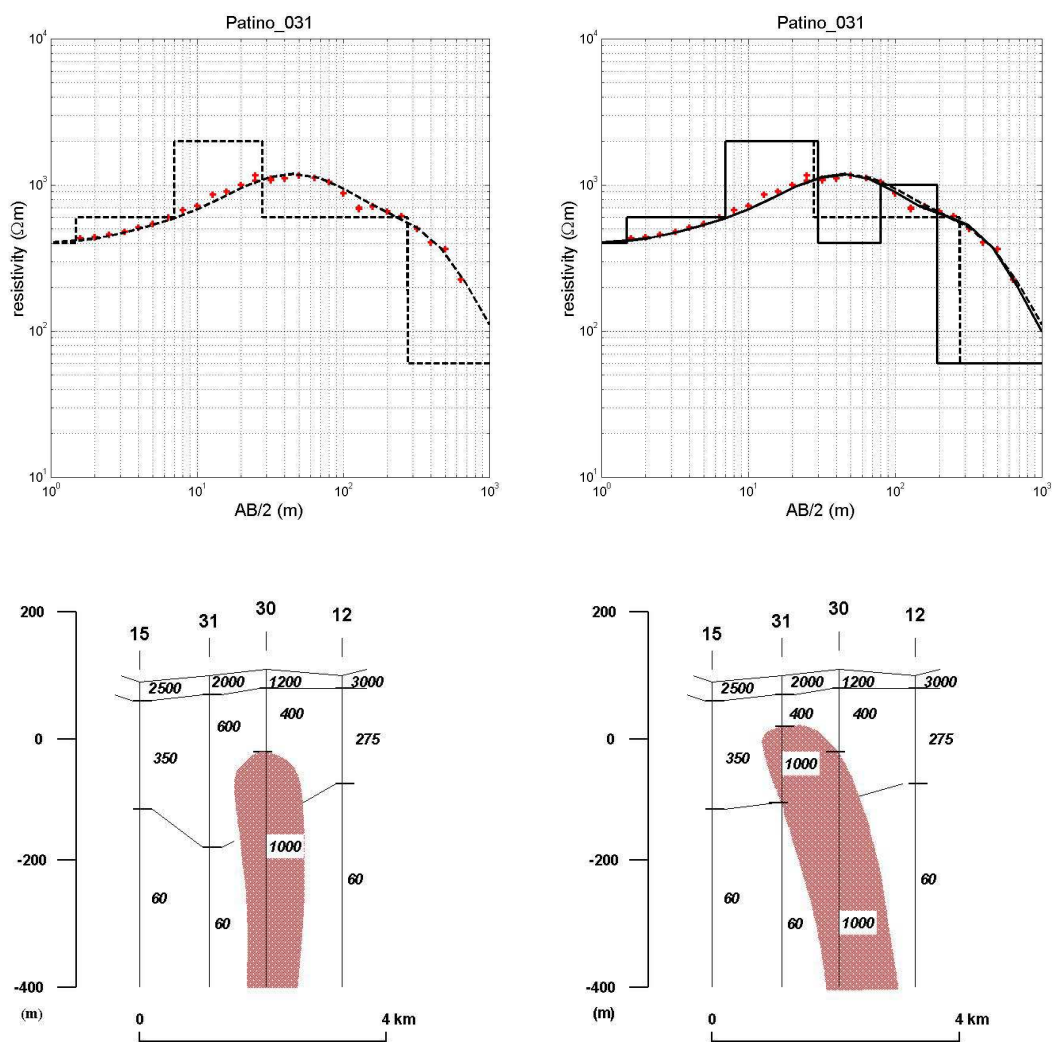


Figura 5-17: SEV31 con dos interpretaciones equivalentes. Modelo de línea discontinua: modelo inicial con capa de arenisca metamórfica; modelo de línea continua: modelo con intrusión de roca ígnea en areniscas.

SEV 26 y 27: curvas con ruido de perturbadores

La Figura 5-18 muestra nuevamente los dos ejemplos de sondeos perturbados en el norte de la zona de estudio (capítulo 4 y la Figura 4-3). En ambos casos, los puntos se

dispersan en las partes finales de las curvas, debido a una gran inestabilidad de las lecturas a distancias electródicos mayores de 160 m. Ambas curvas no se prestan muy bien para ser interpretadas. Sin embargo, se presentan tentativamente unas interpretaciones de estas curvas en la Figura 5-18, inferior. Obviamente, las variaciones en la parte final de las curvas dejan lugar para muchos otros modelos, incluyendo modelos del tipo I con una base de baja resistividad. Sin embargo, se tomo en consideración la ubicación de estos sondeos, que están ubicados dentro de la zona donde no se detecta la base del acuífero. La validez de esa presunción debe ser confirmada por sondeos adicionales en el área o por perforaciones exploratorias.

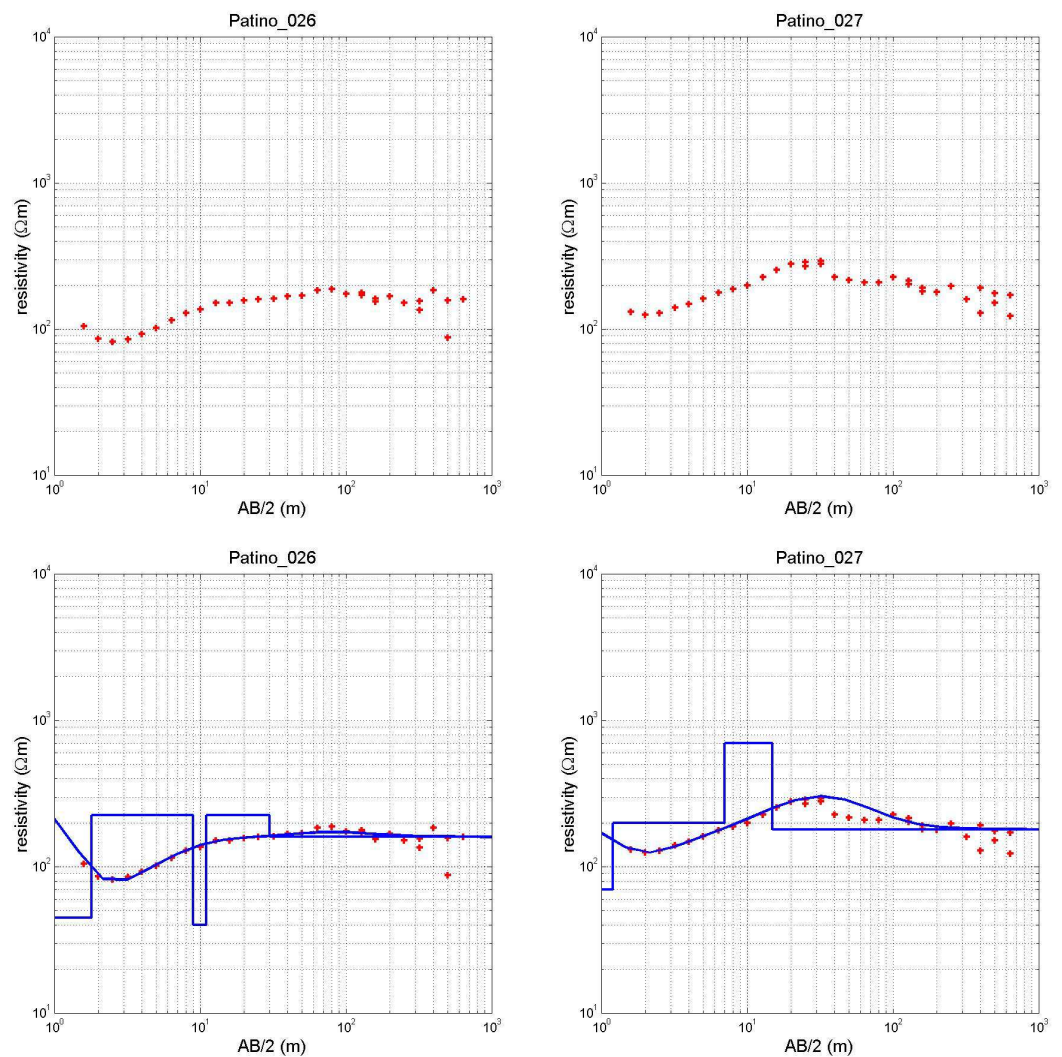


Figura 5-18: Ejemplos de sondeos fuertemente perturbados en la zona de estudio

6 Resultados de la investigación geoelectrica

6.1 Generalidades

Los resultados de la investigación regional están representados en tres mapas y seis perfiles. En los mapas se incluyen información sobre la distribución de los tipos de curvas y como consecuencia, la constitución (hidro-)geológica, sobre la resistividad de la Formación Patiño, y sobre la profundidad de una base de baja resistividad. La ubicación de los cortes geoelectricos está indicada en el mapa de la ubicación de los SEV (Figura 6-1) y en el mapa base en el Anexo B.. La leyenda de los perfiles se encuentra en el anexo B. Cuatro perfiles muestran cortes en dirección aproximada Suroeste-Noreste, mas o menos perpendiculares al cauce del río Paraguay. Los otros dos cortes cruzan la zona en dirección Noroeste-Sureste, aproximadamente perpendicular a los cortes anteriores.

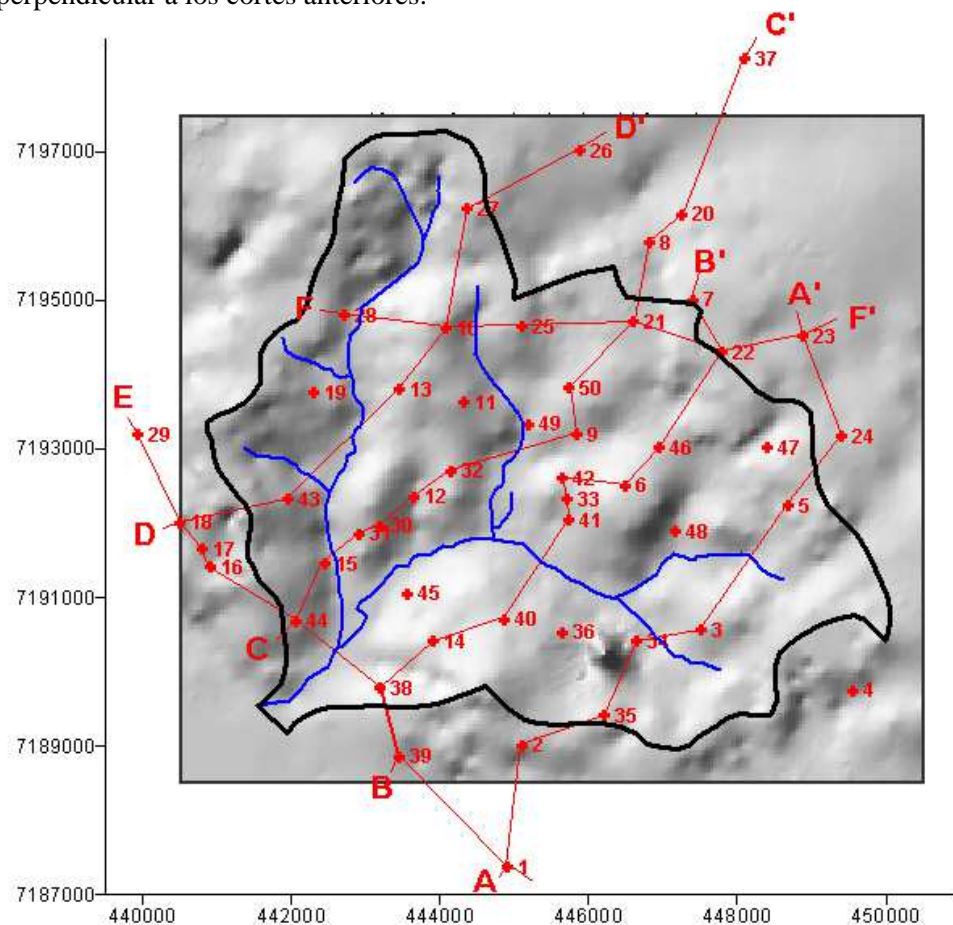


Figura 6-1: La zona de investigación con la ubicación de los sondeos geoelectricos y los cortes

6.2 Los mapas

6.2.1 El mapa de la constitución (hidro-)geológica

El mapa de la constitución (hidro-)geológica (Figura 6-2) está basado sobre la distribución espacial de los diferentes grupos de tipos de curvas geoelectricas (sección 5.3.1). Se puede distinguir cuatro grupos de curvas. Los primeros dos dividen la zona de estudio en dos regiones bien distintas: el sector norte, donde el acuífero arenoso (Formación Patino y posiblemente otros acuíferos subyacentes) aparentemente continúa hasta gran profundidad (más de 400 m) y el sector sur, donde los sondeos claramente indican una base de resistividad baja (30 a 60 Ωm). Se desconoce las características de esta capa. Sin embargo, los bajos valores sugieren la presencia de sedimentos arcillosos o agua subterránea con una gran conductividad y salinidad. Aquí, una perforación exploratoria debe dar la respuesta definitiva a esta duda.

Los últimos dos grupos de tipos de curva tienen relación con las intrusiones de rocas ígneas en la zona. El grupo III indica directamente la presencia de estas rocas por el ascenso de la última parte de la curva a valores altos, generalmente más de 1000 Ωm o por otras formaciones de resistividad alta deducidas a mayor profundidad de las curvas. La presencia de roca ígnea parece ser ligada al sector sur de la zona de estudio. Posiblemente, no todas las altas resistividades se deben a la roca ígnea, en parte también puede representar la arenisca metaforizada por las mismas intrusiones. Los dos sondeos del grupo IV, en contrario, muestran muy bajos valores de resistividad (cerca de 10 Ωm o menos). Ambos sondeos están ubicados en zonas donde está comprobada la presencia de intrusiones, por otros sondeos cercanos y también por informes de perforaciones que tocaron roca ígnea. Posiblemente las bajas resistividades pertenecen a arcillas, creadas por la meteorización de la roca ígnea. También se ha sugerido la posibilidad de diques de sulfuros metálicos o filones metalíferos. Para aclarar, también se necesitará una perforación exploratoria (véase capítulo 8).

Otro parámetro desconocido del modelo del subsuelo es el límite entre los dos sectores principales. En el caso que se trata de una intrusión de agua salada, proveniente del oeste (Chaco), el límite simplemente puede ser el frente de la intrusión. Si, al contrario, se trata de una base arcillosa, la transición abrupta probablemente debe explicarse por la presencia de una falla.

Una anomalía en la distribución de los tipos de sondeos es el SEV 5 en el Este de la zona de estudio. El sondeo parece indicar la base de baja resistividad. En este caso existe posiblemente una falla en el lugar de este sondeo y los sondeos cercanos en que esta base está ausente. Sin embargo, existe una duda en la calidad del SEV 5 y por lo tanto se recomienda ejecutar unos sondeos adicionales en esta parte del área.

Otro sondeo anómalo es el SEV 29 al otro lado de la zona de estudio, en el extremo oeste. En la curva del sondeo parece faltar la base de baja resistividad, como se espera en este sector y como está presente en los sondeos cercanos. Aunque el SEV 29 queda un poco afuera de la zona piloto, se recomienda ejecutar unos sondeos adicionales en este lugar, para aclarar si efectivamente hay un cambio lateral y posiblemente una falla. Otra posibilidad es que las altas resistividades aparentes de la curva están producidas por una intrusión a una mayor profundidad.

Tentativamente se han conectado la zona del Cerro Ñemby y la roca ígnea deducida de los SEV 34 y 36 (¿zona fallada?) con la zona de los SEV 41 y 42, donde también se ha inferido la presencia de intrusiones y donde en el afloramiento se observa la posición inclinada y composición metamórfica de la Formación Patiño (véase la Figura 1-2). Sin embargo, no existe ninguna prueba de esta conexión.

El mapa de la constitución (hidro-)geológica es uno de los resultados más destacados del presente estudio. Presenta un pronóstico geológico, y información desconocida hasta el momento, y dirige investigaciones adicionales necesarias para la definición hidrogeológica. Específicamente, permite seleccionar los sitios óptimos para perforaciones exploratorias con objetivos bien definidos.

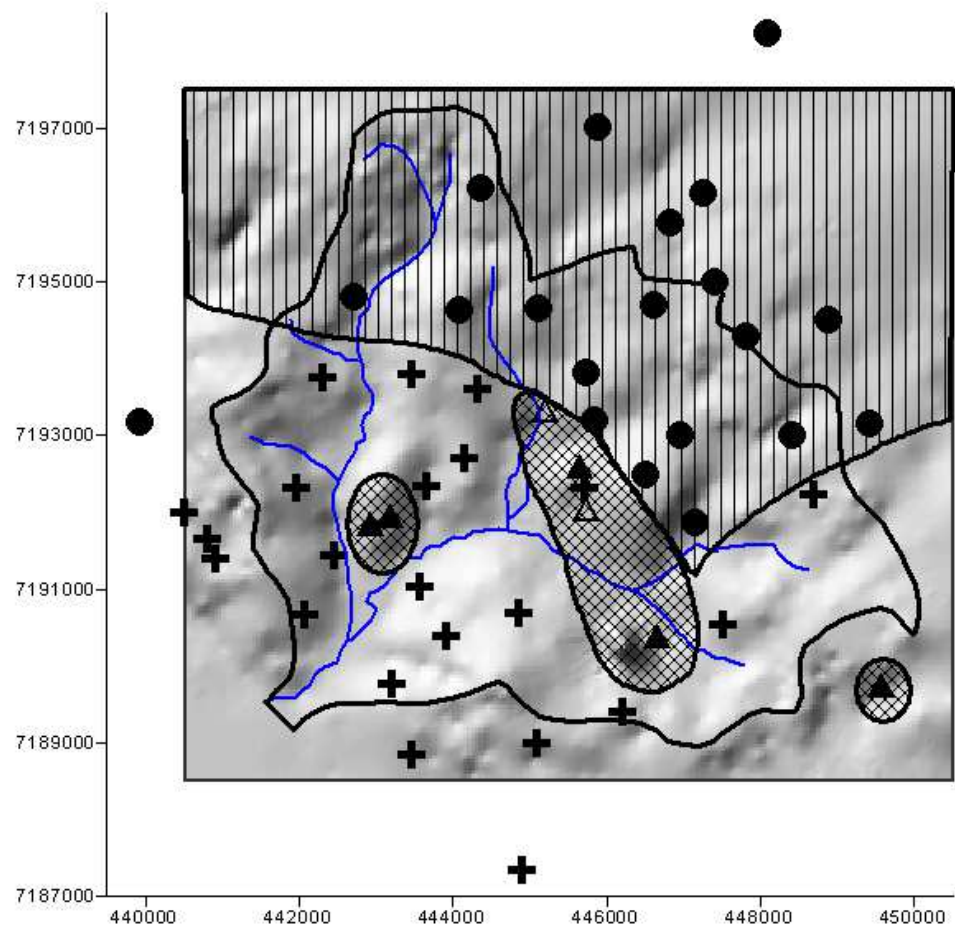


Figura 6-2: Mapa de la distribución de los cuatro grupos de sondeos geoelectricos, representando la constitución (hidro-)geológica. Círculos: acuífero sin base de baja resistividad; cruces: acuífero con base de baja resistividad; triángulos cerrados: intrusiones de roca ígnea; triángulos abiertos: arcillas producidas por meteorización de roca ígnea o diques o filones metalíferos.

6.2.2 El mapa de la resistividad de la Formación Patiño

La Figura 6-3 presenta el mapa de la resistividad de la Formación Patiño. Esta resistividad varía entre 160 y 600 Ωm . Esta variación muy grande probablemente se debe principalmente al grado de compactación de la arenisca. El inventario de la conductividad de agua de pozos en la zona (Molano, 2000) muestra poca variación, lo que hace concluir que variaciones en la resistividad del acuífero se debe en gran parte a cambios litológicos. Como se puede observar en algunos afloramientos de la Formación Patiño en la zona piloto, existen grandes diferencias en la compactación de la arenisca. Localmente, intrusiones de roca ígnea han metamorfoseado la arenisca. En estas rocas la única porosidad y permeabilidad son las secundarias, producidas por

facturación de la roca. En otros lugares, la arenisca esta muy friable y tiene una porosidad y permeabilidad primaria, intra-granular.

El mapa de la resistividad de la Formación Patiño muestra que en general la resistividad aumenta del Noreste hacia el Suroeste. Las altas resistividades en la parte meridional de la zona concuerdan con la presencia de intrusiones de roca ígnea en este sector. Sin embargo, no hay que descartar que además de producir metamorfismo de contacto, intrusiones de rocas ígneas también pueden producir fracturación de los estratos sedimentarios, produciendo así zonas de resistividad relativamente baja.

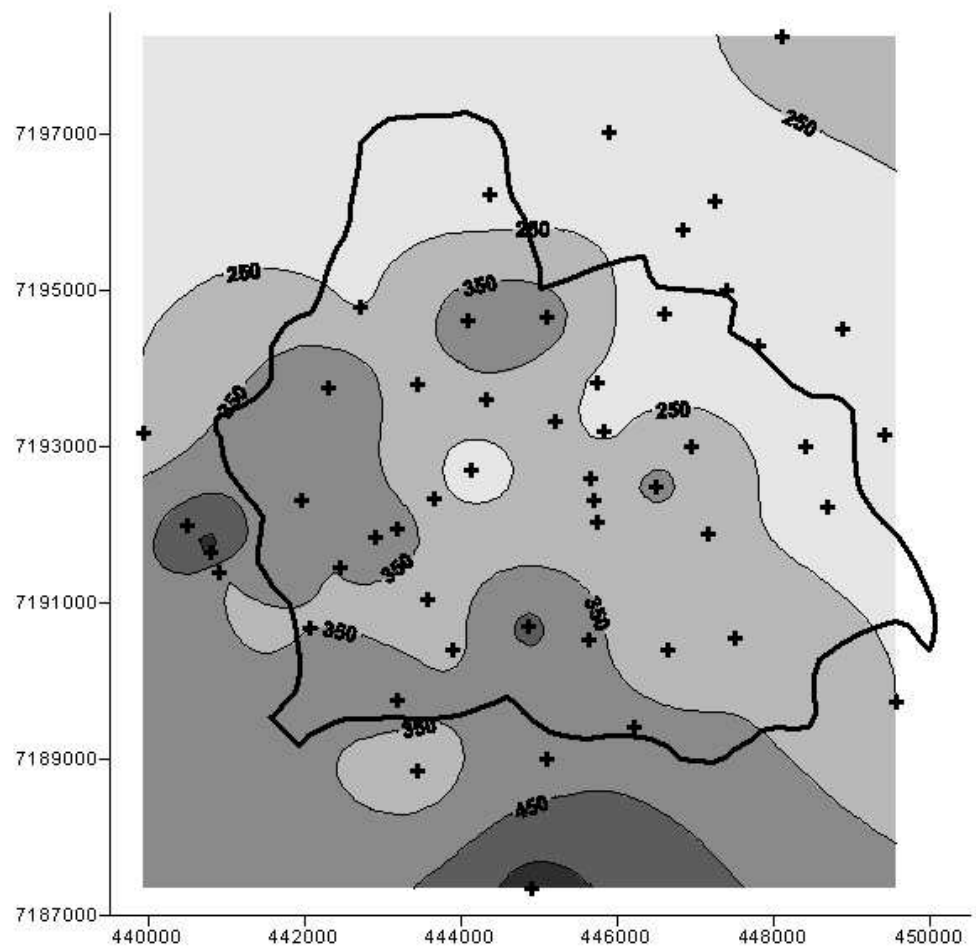


Figura 6-3: Mapa de la resistividad de la Formación Patiño en la zona piloto. El intervalo entre las curvas de iso-resistividad es 100 Ωm . Los cruces marcan los sondeos geoelectricos.

6.2.3 El mapa de la profundidad hasta la capa de baja resistividad

En el sector Sur de la zona de estudio, los sondeos geoelectricos indican la presencia de una capa de baja resistividad ($30 - 60 \Omega\text{m}$) debajo el acuífero Patiño. La naturaleza de esta capa se desconoce hasta la fecha y forma uno de los objetivos principales de una perforación exploratoria programada. Puede ser compuesta por material arcilloso, formando así la base del acuífero, o por areniscas conteniendo agua de alta salinidad.

El mapa de la Figura 6-4 presenta la profundidad, en metros bajo la superficie, hasta el techo de esta capa de baja resistividad. El intervalo entre las curvas de nivel es de 25 m. La profundidad, como deducida de los sondeos geoelectricos, varia entre 170 y 320 m. Existe una relación entre la resistividad del acuífero (sección 6.2.2) y su espesor o profundidad. Debido al principio de equivalencia, pueden resultar de la interpretación de las curvas varios modelos con diferentes relaciones entre la resistividad y el espesor. Así un aumento de la resistividad del acuífero estará acompañado por una reducción de su espesor y profundidad. Relacionado a esto, es importante notar que en la zona recomendada para la perforación exploratoria (véase capítulo 8) se encuentra una combinación de una profundidad (y espesor) reducida (200 m) con una resistividad de la formación relativamente alto ($350 \Omega\text{m}$). Esta combinación crea confianza para el éxito de llegar a la capa de baja resistividad en la perforación exploratoria.

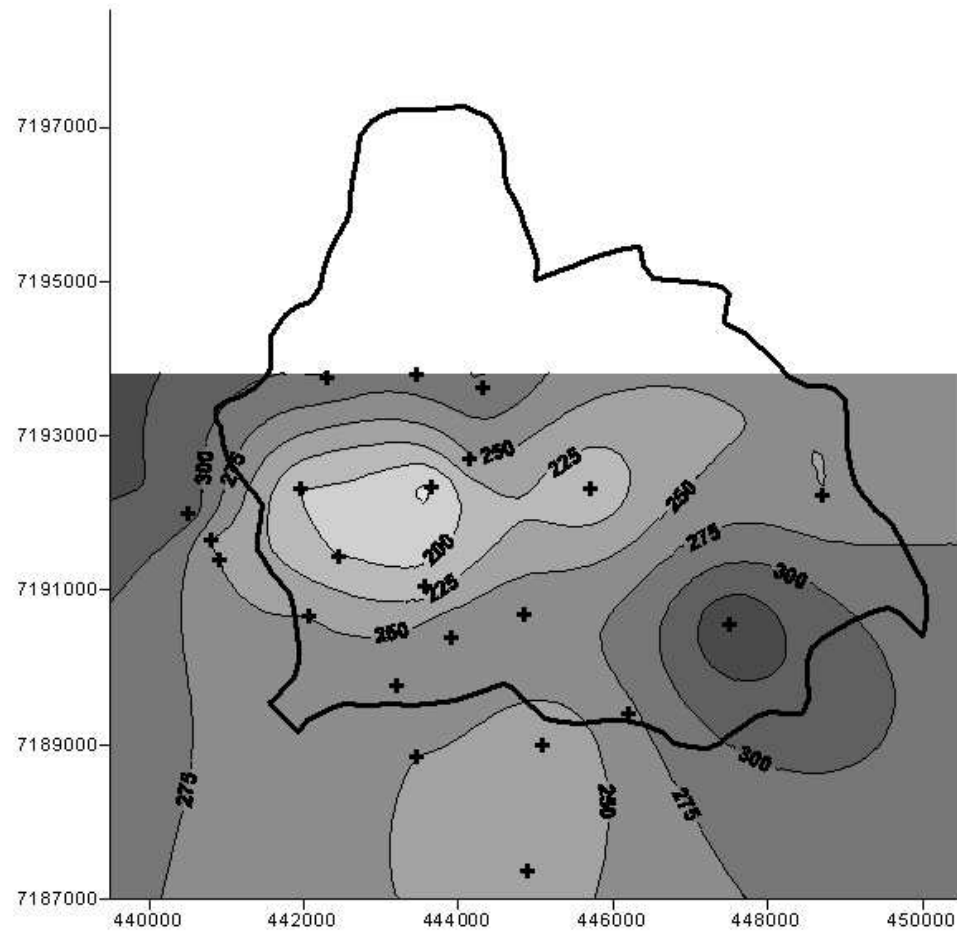


Figura 6-4: Mapa de la profundidad hasta la base del acuífero. El intervalo entre las curvas de nivel es 25 m. Los cruces marcan los sondeos geoelectríticos.

6.3 Los cortes geoelectríticos

6.3.1 El corte geoelectrítico A-A'

Este perfil (Figura 6-5¹), compuesto de 8 sondeos geoelectríticos, corre del Suroeste al Noreste por la parte oriental del área de estudio y tiene una longitud de 9.5 km. El corte muestra los tres clases de sondeos presentes en la zona piloto del acuífero Patiño. En la parte meridional el acuífero esta limitado en su base por una capa de baja resistividad (30-60 Ω m). Esta base falta en los dos sondeos en el extremo norte del perfil. Estos sondeos, SEV 23 y 24 son de mala calidad (véase Figura 4-3) y pueden ser interpretado en forma muy diferente. Sin embargo, a pesar de la dispersión de los puntos medidos,

¹ La leyenda de los perfiles esta en el Anexo C

tanto la forma de las curvas como su ubicación en el área justifican interpretarlos con el modelo en que falta la capa de baja resistividad. En el centro del perfil, intrusiones y extrusiones de roca ígnea, como observado en el Cerro Ñemby, interrumpen la secuencia de los estratos sedimentarios. En este sector y en la parte meridional del corte, las resistividades de la Formación Patiño son bien altas: 350 a 600 Ωm . El espesor del acuífero en la parte meridional del perfil varía entre 200 y 325 m. La nivelación en la parte central de algunos de los sondeos claramente indica estos valores de la resistividad e la formación; ejemplos lúcidos son los SEV 1 y 3. En contraste, los valores de la resistividad de la formación en la parte septentrional, donde falta la base de baja resistividad, son relativamente bajos: de 200 a 240 Ωm . Los valores altos indican un alto grado de compactación, y posiblemente alteración por metamorfismo, limitando la porosidad y la permeabilidad del acuífero a las zonas fracturadas. El único sondeo que indica directamente la presencia de roca ígnea es el SEV 34; en su parte final, este sondeo sube fuertemente indicando resistividades de más de 2000 Ωm . Arriba de esta base resistiva de la intrusión, la resistividad es de 250 Ωm . Probablemente representa el acuífero Patiño, que tan cerca de la intrusión se presume ser muy compactada, pero a la vez muy fracturada, produciendo su valor relativamente baja.

Cerca del cauce del arroyo Ñemby está el pozo CL-P0109 con una profundidad de 152 m. La columna litológica muestra una sucesión de areniscas cuarzosas de grano fino a grueso. En la base del pozo, a 150 m, se encontró un conglomerado arcilloso. Existe un perfilaje geofísico en este pozo (véase Figura 5-14) que confirma la resistividad promedio (350 Ωm) del acuífero como deducida del SEV 3. Confirme también la presencia de delgadas capas de sedimentos arcillosos, como tentativamente ha sido interpretada del SEV 1 a una profundidad de 30 m.

La mayoría de los SEV ejecutados a lo largo de este corte indican en su parte superior resistividades muy altas de 1000 a 2000 Ωm . Esta zona corresponde a la arenisca seca y la interfaz con la capa subyacente luego pertenece al nivel del agua. La precisión de la profundidad de esta interfaz no es muy grande, debido a la equivalencia en la interpretación de los sondeos.

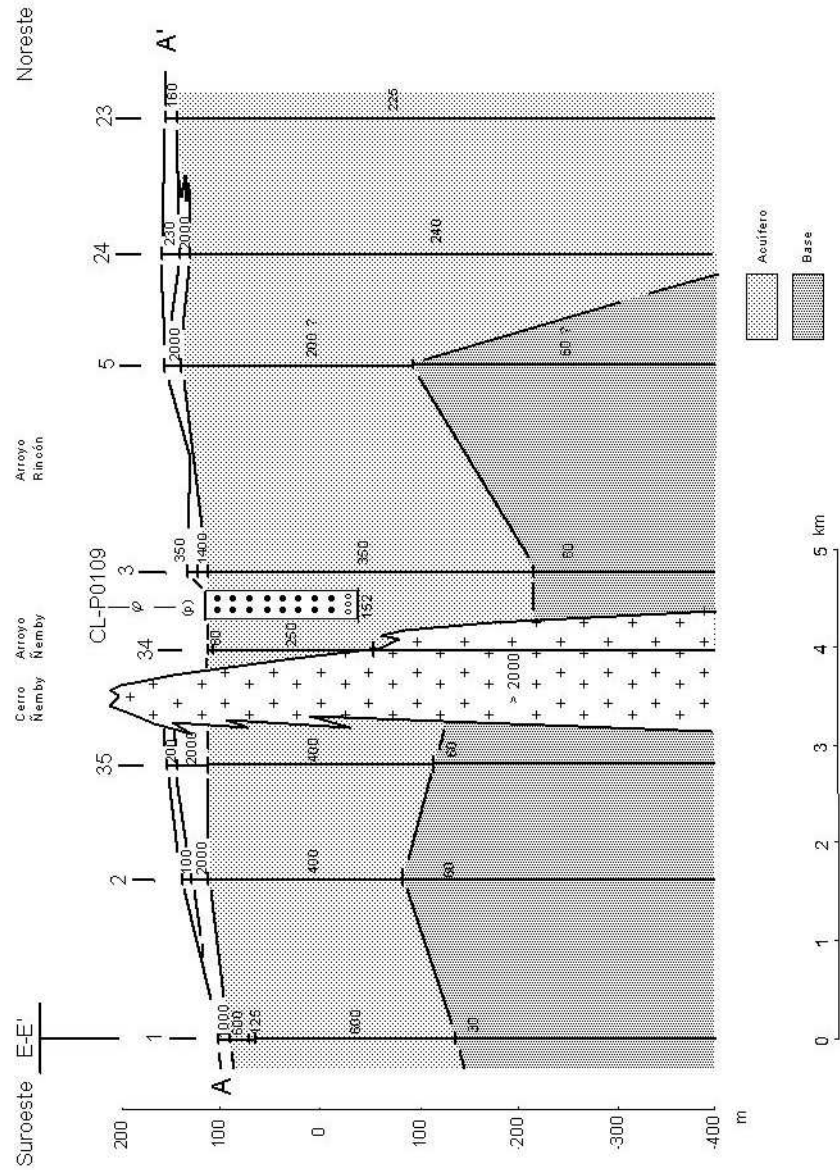


Figura 6-5: El corte geoelectrico A-A'

6.3.2 El corte geoelectrico B-B'

Este perfil (Figura 6-6), compuesto de 11 sondeos geoelectricos, corre prácticamente paralelo al perfil A-A', a una distancia de aproximadamente 2 km. Tiene una longitud de 9.2 km. El corte se muestra muy similar al corte A-A'. También se distingue una parte meridional con la base de baja resistividad ($60 \Omega\text{m}$) y la parte septentrional donde falta esta ultima capa. Y aquí también una intrusión de roca ígnea interrumpe la estratificación sedimentaria. Evidencia directa de esta intrusión falta en la superficie. Sin embargo, a poca distancia existe un afloramiento de las areniscas de la Formación Patiño (véase Figura 1-2). Aquí los estratos están claramente inclinados, aparentemente llevado a esta posición por el empuje de la intrusión, y en parte compactada y alterada por metamorfismo.

La resistividad del acuífero Patiño varia entre 280 y 480 Ωm en la cercanía de la intrusión y en la parte meridional del perfil y entre 160 y 170 Ωm . El espesor del acuífero Patiño en la zona donde la capa de baja resistividad forma su limite inferior, varia entre 175 y 250 m.

La intrusión de roca ígnea se refleja en el SEV 42 por el ascenso de la ultima parte de la curva (véase Figura 5-8), indicando resistividades de 2000 Ωm o más. Arriba de la roca ígnea debe estar la Formación Patiño con un valor de resistividad de 350 Ωm . Cercano a este sondeo esta el SEV 33, que da un valor de 250 Ωm para el acuífero. Esto puede señalar un alto grado de facturación, similar al SEV 34 en el corte geoelectrico A-A' (véase sección 6.3.1).

Un sondeo geoelectrico completamente anómalo es el SEV 41 (Figura 6-7, arriba), ubicado también muy cerca de la inferida intrusión. Pertenece al grupo de sondeos numero IV, cuyo origen no esta muy claro, pero que probablemente esta relacionada con intrusiones de roca ígnea. Se caracteriza estos sondeos por una capa de muy baja resistividad de considerable espesor a poca profundidad. La resistividad de esta capa en el SEV 41 es de 13 Ωm . En la cercanía del SEV 41, se intentó ejecutar sondeos eléctricos verticales adicionales. Estos sondeos, representado en la Figura 6-7, abajo), obviamente no resultaron. La forma de las curvas, con una fuerte bajada seguida por un ascenso de más de 45 grados, típicamente indica la presencia de conductores en el subsuelo, produciendo una forma de fuga de corriente.

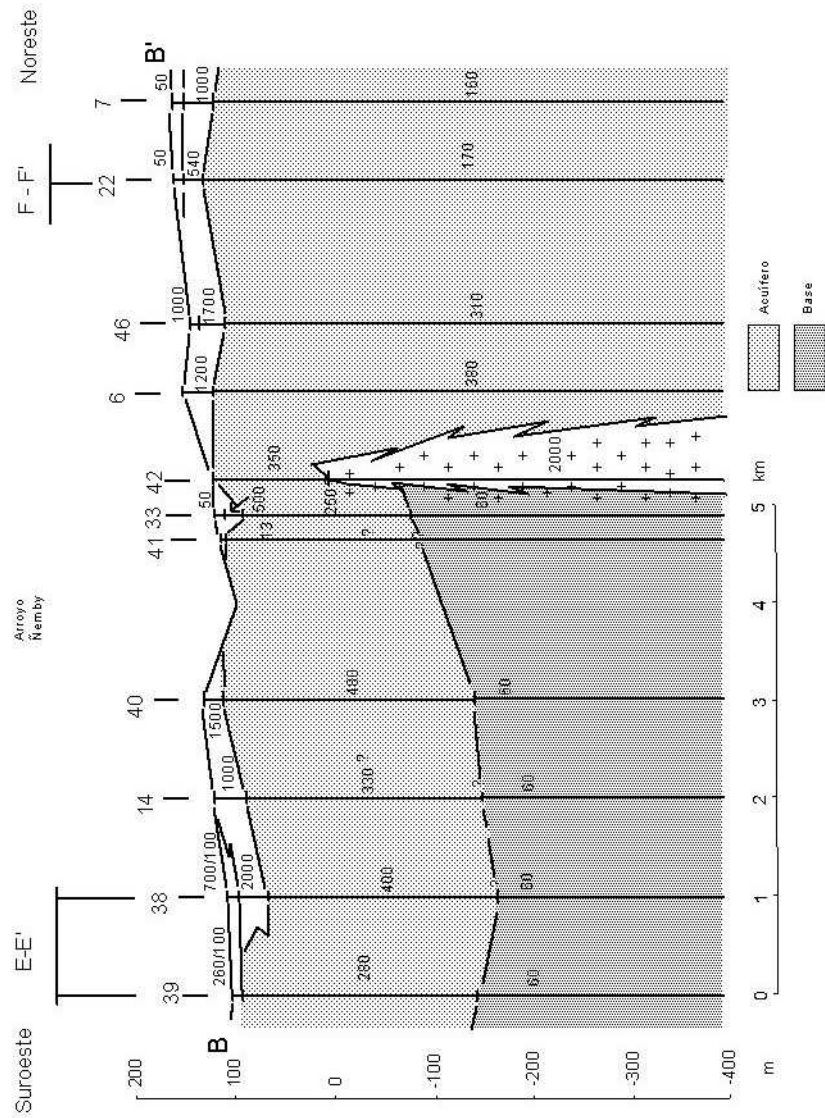


Figura 6-6: El corte geoelectrico B-B'

Luego, en el lugar del SEV 41 se realizó un perfil geoelectrico ('calicatas eléctricas') para estimar el ancho de la zona de muy baja resistividad. Este perfil, dado en la Figura 6-8, muestra resistividades muy bajas en una distancia mayor de 200 m. Esta zona anómala puede representar diques o filones metalíferos o zonas meteorizadas y arcillosas. Sin embargo, no se puede excluir una fuente artificial para esta anomalía eléctrica.

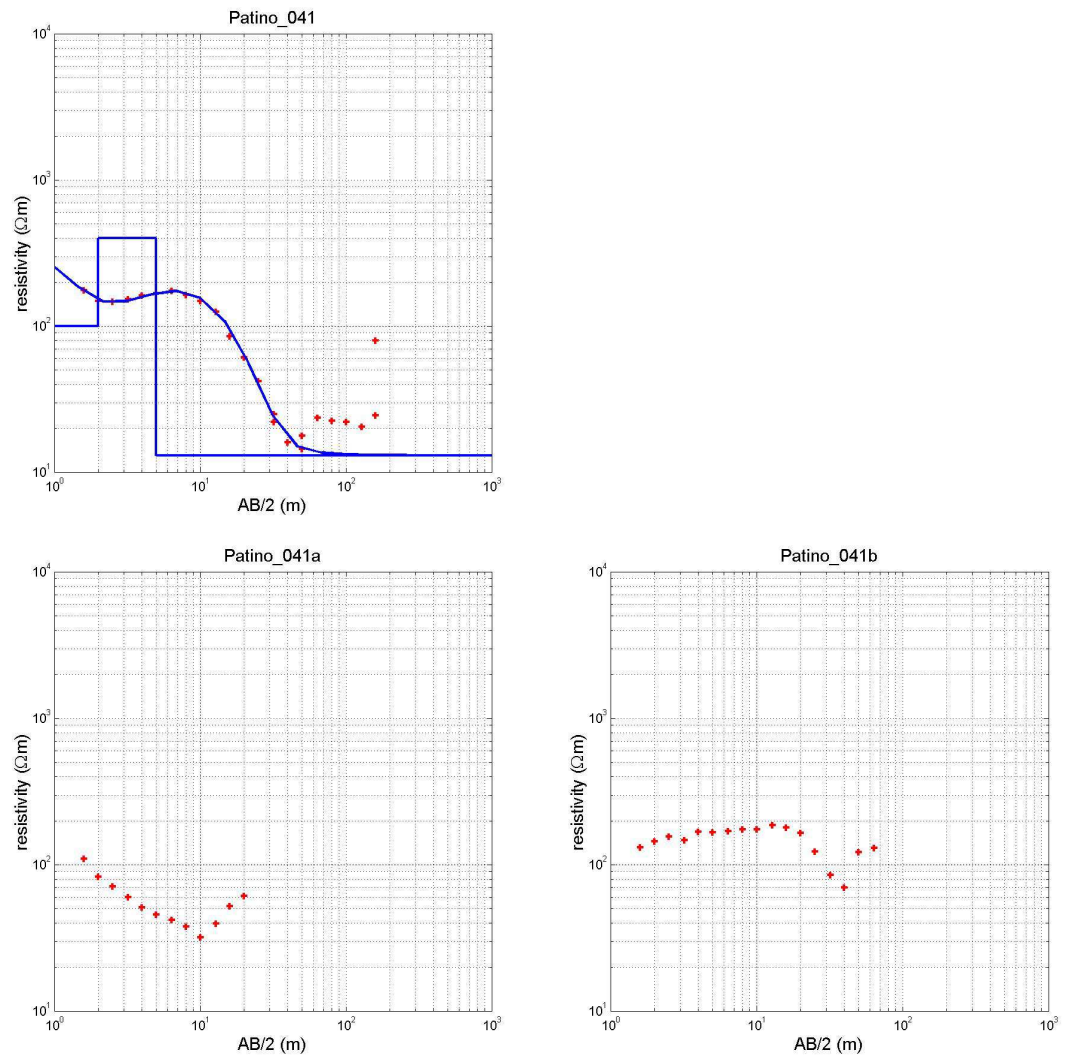


Figura 6-7: SEV 41 y dos sondeos eléctricos verticales efectuados en la cercanía del SEV 41: testimonios de circunstancias anómalas y de la presencia de depósitos o artefactos conductores en el subsuelo.

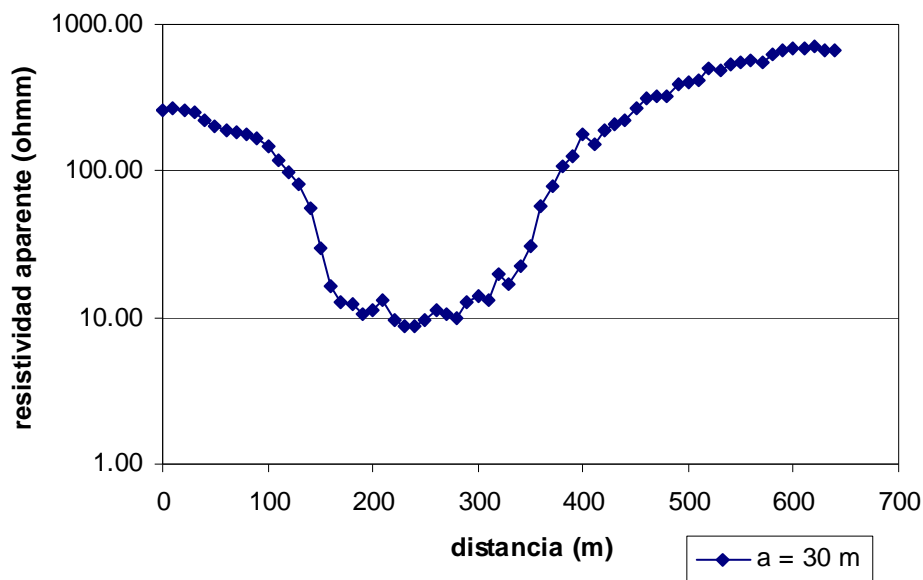


Figura 6-8: Perfil geoelectrico ('calicatas eléctricas') sobre la zona de muy baja resistividad en la cercanía del SEV 41.

Salvo el SEV 39, todos los sondeos a lo largo de este corte tienen resistividades altas a muy altas de 500 a 2000 Ωm en su parte superior, marcando la parte no-saturada de la arenisca.

6.3.3 El corte geoelectrico C-C'

El perfil C-C' (Figura 6-9), compuesto de 12 sondeos geoelectricos corre del Suroeste al Noreste por el centro de la zona de estudio, entre el municipio de San Antonio y el campus de la universidad en San Lorenzo. Tiene una longitud de 10.5 km. El corte es similar a los cortes A-A' y B-B', distinguiendo las tres diferentes zonas: la zona con la base de baja resistividad, la zona sin esta capa y una zona marcada por una intrusión de roca ígnea. En la parte meridional, la base tiene una resistividad de 40 a 60 Ωm . Aquí, el acuífero Patiño tiene una resistividad alta de 350 a 400 Ωm en la cercanía de la intrusión. A mayor distancia de eso, disminuyen los valores a 200 – 250 Ωm , similar a los valores deducidos en la zona sin la base de baja resistividad. Donde esta presenta la base, el espesor del acuífero es de 150 a 225 m.

La presencia de la intrusión de roca ígnea se ha deducido de los SEV 30 y 31 (véase la sección 5.4.4 y la Figura 5-17). No hay pruebas directas o evidencias adicionales de esta intrusión. Sin embargo, su presencia sigue de la interpretación del SEV 30 con un ascenso en su última parte.

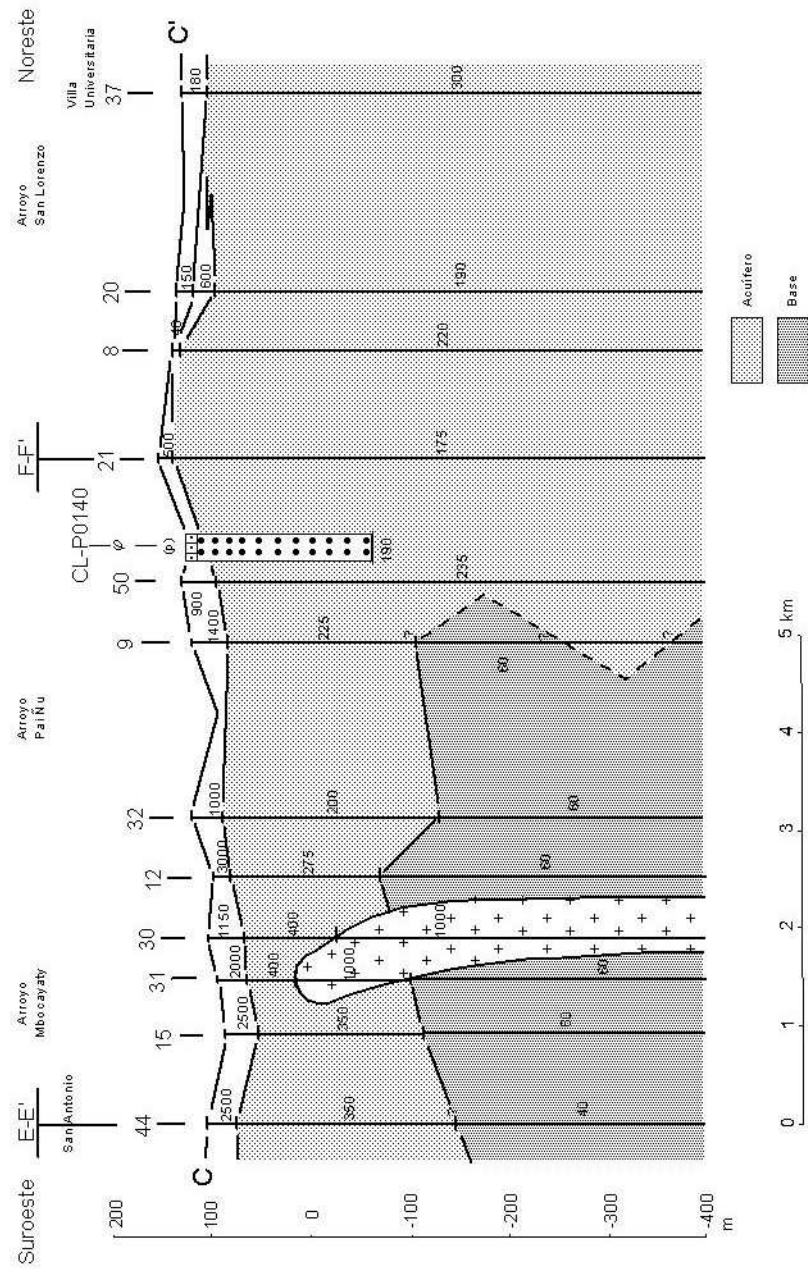


Figura 6-9: El corte geoelectrico C-C'

A lo largo de la parte meridional del corte se han deducidos valores de resistividad muy altos (1000 a 3000 Ωm) en la parte superior de las curvas, representando la zona seca. Las capas superiores en la parte septentrional tienen valores más bajos de 150 a 600 Ωm .

Entre el SEV 50 del corte geoelectrico C-C' y el cauce del arroyo Pai Ñu está el pozo CL-P0140 con una profundidad de 190 m (véase sección 5.4.3). La columna litológica muestra una sucesión de arenas o areniscas hasta esta profundidad. Existe un perfilaje geofísico en este pozo (véase Figura 5-15) que confirma la presencia de resistividades de varios cientos de ohmiosmetros.

Una curva SEV problemática es el SEV 9 (Figura 6-10, izquierda), cuyo ultima parte no está claramente definida. Como muestran dos modelos de interpretación equivalentes (Figura 6-10, derecha), los primeros puntos de la bajada parecen indicar una ultima capa de baja resistividad (60 Ωm) y concuerdan con el modelo de la línea continua, mientras que los últimos puntos parecen nivelar, indicando una capa de una resistividad de unos 125 Ωm (modelo de línea discontinua). Es probable que la ubicación de este sondeo es muy cerca al limite entre las dos zonas, y que la curva, al incrementar la distancia eléctrica, viene influenciada por ambas. Obviamente, una resistividad de 125 Ωm es un valor demasiado bajo para el acuífero en la zona piloto. Por lo tanto, en el perfil están indicados los valores correspondientes al modelo con la capa inferior de baja resistividad.

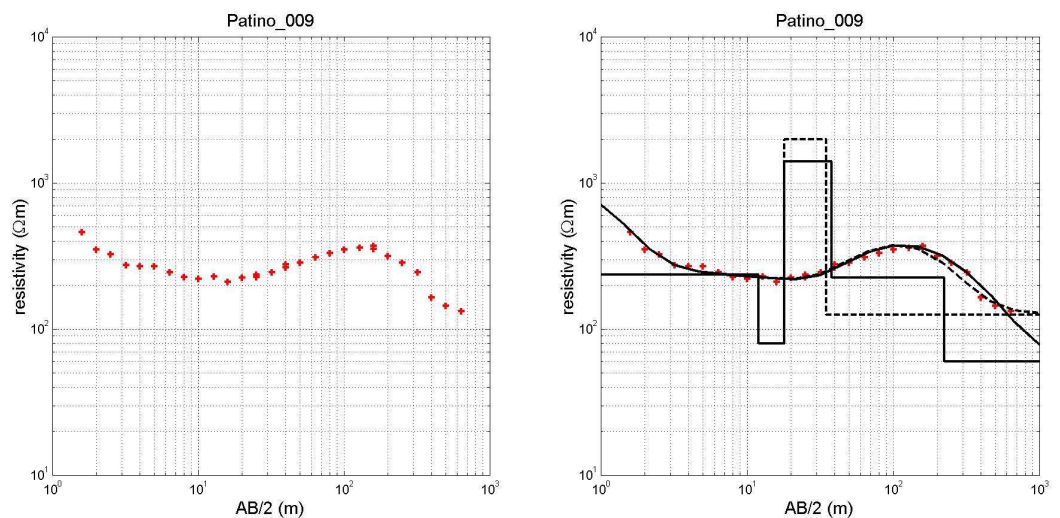


Figura 6-10: El SEV 9 (izquierda) y dos interpretaciones equivalentes (derecha), resultado de su ubicación en el limite entre dos zonas de diferente características.

Muy cerca al corte geoelectrico C-C' y al SEV 9, se ha medido el SEV 49 (véase la Figura 5-9). Este SEV representa el grupo IV, que posiblemente se correlaciona con actividad intrusiva de roca ígnea. Posiblemente el carácter ambivalente del SEV 9 también tiene que ver con la existencia de filones o diques.

6.3.4 El corte geoelectrico D-D'

El perfil D-D' (Figura 6-11), compuesto de 6 sondeos geoelectricos es el más occidental de la serie y corre del Suroeste al Noreste de Villa Elisa a San Lorenzo. Tiene una longitud de 8 km. Es similar a los cortes A-A' , B-B' y C-C' en que distingue entre una zona con la base de baja resistividad y otra zona sin esta capa. Pero difiere de estos perfiles en que no muestra intrusiones de roca ígnea.

Los tres sondeos de la parte sur indican con certidumbre la presencia de la base de baja resistividad (30 – 60 Ω m). En esta zona tanto el valor de resistividad como del espesor del acuífero varían mucho: de 300 a 500 Ω m y de 175 a 275 m respectivamente. Debido al espesor reducido y la evidente presencia de la capa de baja resistividad, se seleccionó el sitio del SEV 43, junto con el SEV 15 (véase capítulo 8 y la Figura 8-1) , como sitio para una perforación exploratorio para (entre otros objetivos) determinar la naturaleza y las características de esta capa de baja resistividad.

El SEV 10 (véase Figura 5-10) es una curva simple de prácticamente dos capas y claramente indica el valor de 410 Ω m para el acuífero Patiño y la ausencia de una capa subyacente de baja resistividad. Sin embargo, el valor de formación es alto para esta zona, lo cual podría indicar un grado de metamorfismo de la arenisca, baja la influencia de intrusiones. Resistividades mucho más bajas han sido deducidas de los SEV 27 y 26. Sin embargo, como descrito en el capítulo 4 (véase la Figura 4-3), la calidad de estos dos sondeos es mala y luego la interpretación no muy confiable.

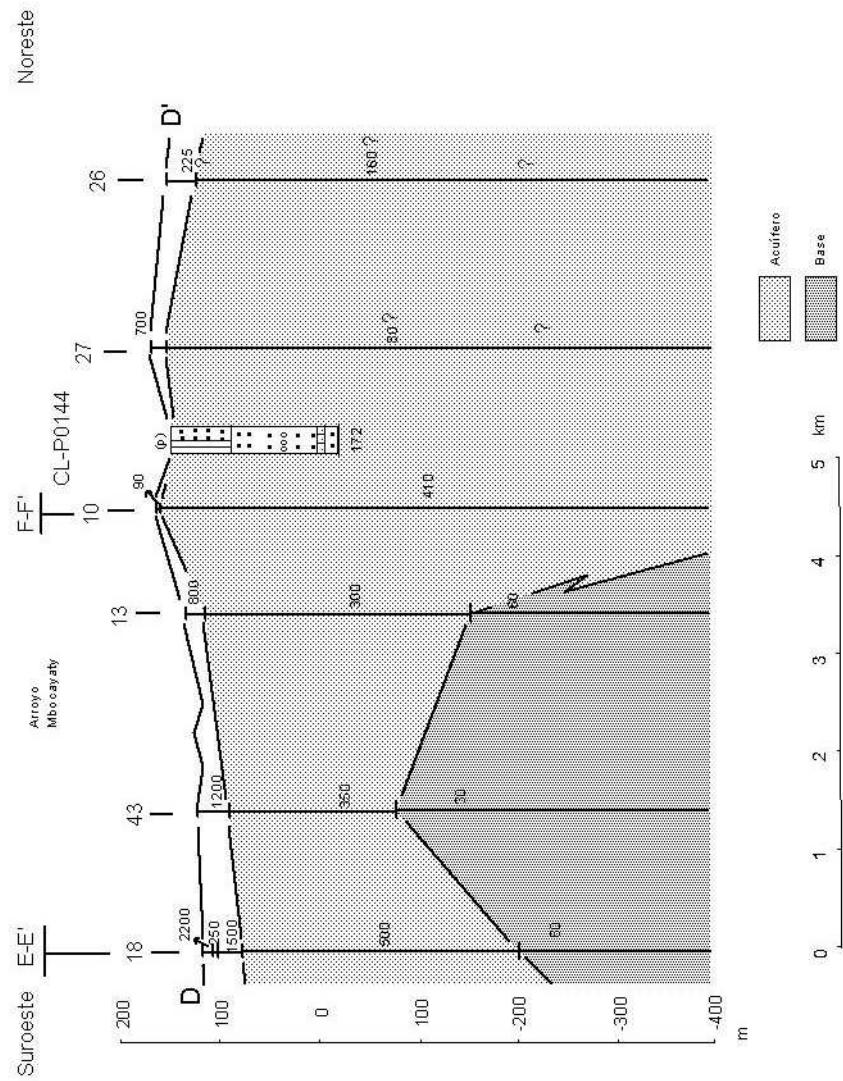


Figura 6-11: El corte geoelectrico D-D'

6.3.5 El corte geoelectrico E-E'

El corte geoelectrico E-E' (Figura 6-12) es un perfil en dirección Noroeste-Sureste, paralelo al río Paraguay. Esta compuesto de 8 sondeos geoelectricos y tiene una longitud de 8 km. El corte representa el modelo para la parte sur del área del estudio, donde debajo de las areniscas del acuífero Patiño se observa la presencia de una capa de baja resistividad, cuyo origen aun se desconoce. La única excepción a este modelo es el SEV 29, en el extremo oeste del perfil. Esta curva no muestra una bajada en su parte final, y antes muestra un ascenso. No es muy claro, si esta parte de la curva refleja la constitución del subsuelo, o más bien esta distorsionado por ruido externo o fuga de corriente, como lo que se puede observar en el primer empalme de la curva. Es importante notar los altos valores de la resistividad de la Formación Patiño que ocurren localmente. Por ejemplo en los SEV 1, 17 y 18, donde se interpretaron valores de 500 a 600 Ω m. Estos valores sugieren un alto grado de compactación, posiblemente causado por metamorfismo debido a intrusiones.

La parte final del SEV 16 es de mala calidad (por razones desconocidas), pero muestra mucha semejanza con la parte final del SEV 44 de buena calidad, y ha sido interpretado de acuerdo al modelo de esto. El espesor del acuífero a lo largo del perfil es mas o menos constante: unos 200 a 250 m.

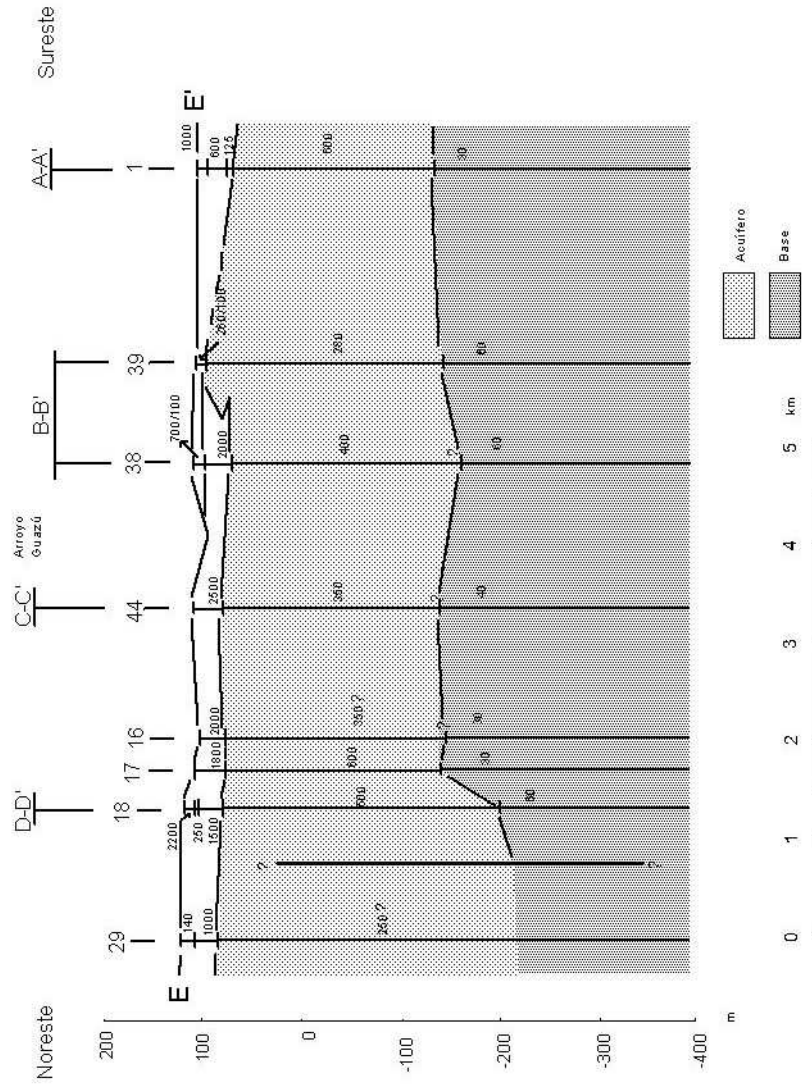


Figura 6-12: El corte geoelectrico E-E'

6.3.6 El corte geoelectrico F-F'

El corte geoelectrico E-E' (Figura 6-13) es un perfil en dirección Oeste-Este, y es representativo para el sector norte de la zona de estudio, donde falta la base del acuífero de baja resistividad. El perfil está compuesto por 6 sondeos geoelectricos y tiene una longitud de 6.3 km. El acuífero comienza debajo de una capa superficial, generalmente de alta resistividad (500 – 1000 Ω m). Se extiende hasta gran profundidad, mayor a 400 m. Se observa una variación grande en la resistividad de la Formación Patiño. En cuatro sondeos se dedujo un valor entre 170 y 240 Ω m, mientras que en dos sondeos se interpretó un valor de 400 – 410 Ω m. De estos, se nota especialmente la buena calidad del SEV 25 (véase Figura 5-15). Estos altos valores de resistividad probablemente se debe al grado de compactación y el efecto de metamorfismo producido por intrusiones.

Cerca al SEV 28, se perforó el pozo CL-P0146. Este pozo encontró una capa de arcilla con cantos rodados a una profundidad de 126 m y fue abandonado. El perfilaje geofísico efectuado en el pozo con el equipo análogo es de mala calidad. Después se realizo un perfilaje en el pozo entubado. El registro gamma produce un perfil muy constante y solamente indica variaciones entre 60 y 70 m y a 110 m de profundidad (capas de grano mas fino).

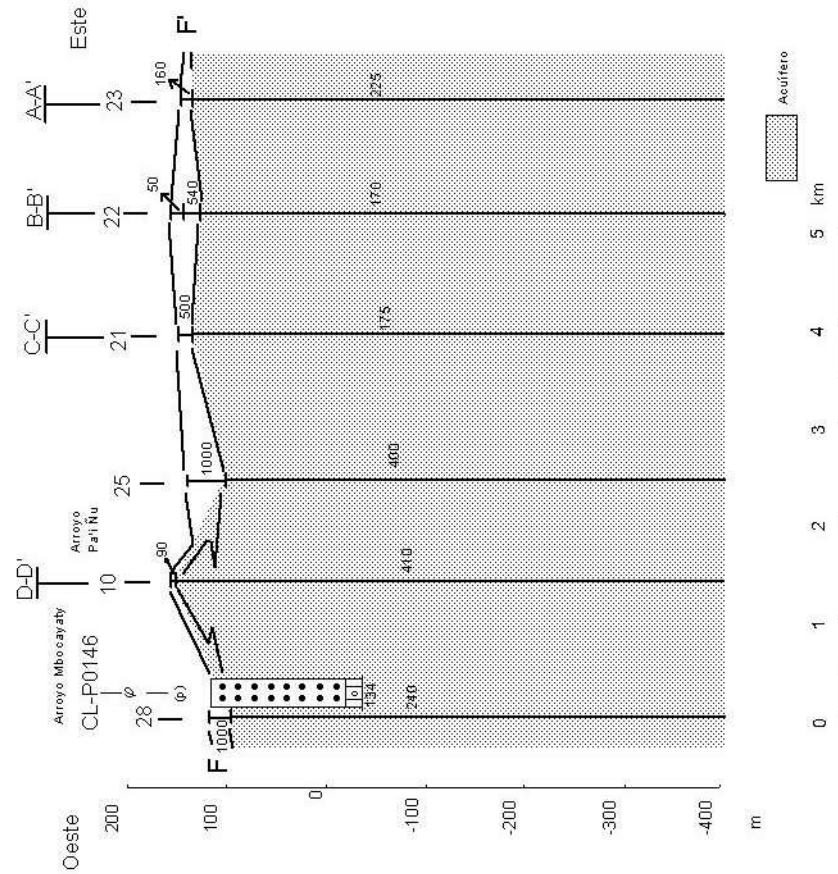


Figura 6-13: El corte geoelectrico F-F'

7 Conclusiones

1. La técnica de Sondeos Eléctricos Verticales comprobó ser un método excelente y eficaz para delinear la geometría del acuífero Patiño y determinar sus características. Eso se debe a los buenos contrastes que existen entre la arenisca seca y la arenisca saturada por un lado, y entre el acuífero y su base de baja resistividad, donde este está presente. El acuífero también se distingue bien de las intrusiones de roca ígnea caracterizadas por muy altas resistividades.
2. El resultado más destacado del presente estudio, es la división de la zona piloto en dos regiones principales. En la parte meridional, una capa de baja resistividad (30 - 60 Ωm) forma la base del acuífero Patiño. La naturaleza de esta base se desconoce, pero su baja resistividad sugiera estratos arcillosos o formaciones con agua de alta salinidad. La profundidad de esta base del acuífero, como deducida de los sondeos geoelectrónicos, varía entre 170 y 350 m. En la parte septentrional del área, formaciones con altas resistividades (160 - 410 Ωm) se extienden hasta una profundidad mayor que la profundidad de investigación (>400 m), con las máximas distancias eléctricas utilizadas. Estas rocas son las areniscas de la Formación Patiño, y posiblemente también de areniscas de formaciones más antiguas y subyacentes.
3. En el sur y el centro del área de estudio se encuentra la tercera zona con rocas ígneas intrusivas y extrusivas de edad Terciaria. Un testimonio de estas últimas son los basaltos que afloran en el Cerro Ñemby. Las rocas ígneas producen resistividades muy altas (>1000 Ωm), como fueron deducidas de unos cuatro sondeos geoelectrónicos. Otros sondeos geoelectrónicos con resistividades muy bajas (cerca de 10 Ωm) a poca profundidad probablemente también están relacionados con las intrusiones. Posiblemente representan productos arcillosos de meteorización o diques o filones sulfúricos y metalíferos.
4. La actividad magmática ha alterado las areniscas del acuífero Patiño, dejando areniscas metamórficas, como se puede observar en un afloramiento al noroeste del Cerro Ñemby. Compactación y metamorfismo local explican la gran variación en la resistividad de la formación como deducida para el acuífero Patiño (160 - 600 Ωm). Mientras que en zonas no afectadas por las intrusiones, la porosidad es granular, en zonas alteradas, el agua subterránea se limite a las zonas fracturadas de las areniscas compactas y metamórficas.

8 Recomendaciones

Para complementar el estudio geofísico en la zona piloto y aclarar las dudas que quedan después esta primera investigación regional en la zona, se recomienda perforar pozos exploratorios y ejecutar mediciones geofísicas adicionales, incluyendo sondeos eléctricos verticales, perfiles geoeléctricos y mediciones magnéticas.

La recomendación principal es realizar una perforación exploratoria hasta gran profundidad (300 m). Además se recomienda una perforación somera para establecer la composición del material de muy baja resistividad en las zonas de intrusiones. Finalmente se da recomendaciones para unos sondeos geoeléctricos adicionales para aclarar el modelo geoeléctrico del subsuelo en algunos sectores y para definir en mas detalle el limite entre las dos zonas principales.

8.1 Pozos exploratorios

1. Para determinar la naturaleza de la base de baja resistividad se recomienda efectuar una perforación exploratoria en la parte meridional de la zona piloto donde los sondeos geoeléctricos indican la presencia de esta base. En el plan del proyecto FEHS esta contemplado la perforación de un pozo exploratorio hasta una profundidad de 300 m. Entonces, la selección del sitio para este pozo debe considerar solo lugares donde los SEV indica la base a una menor profundidad. Y considerando el principio de equivalencia en los modelos de la interpretación, se recomienda sitios donde la base está a una profundidad considerablemente menor de 300 m. Por lo tanto, se seleccionó una zona entre las comunidades de Villa Elisa y San Antonio, y más específicamente el área entre los SEV 15 y 43. Se muestran estos dos sondeos eléctricos y su interpretación en la Figura 8-1. El sitio finalmente recomendado para la perforación y la ubicación de estos dos sondeos están indicados en el mapa de la Figura 8-2.

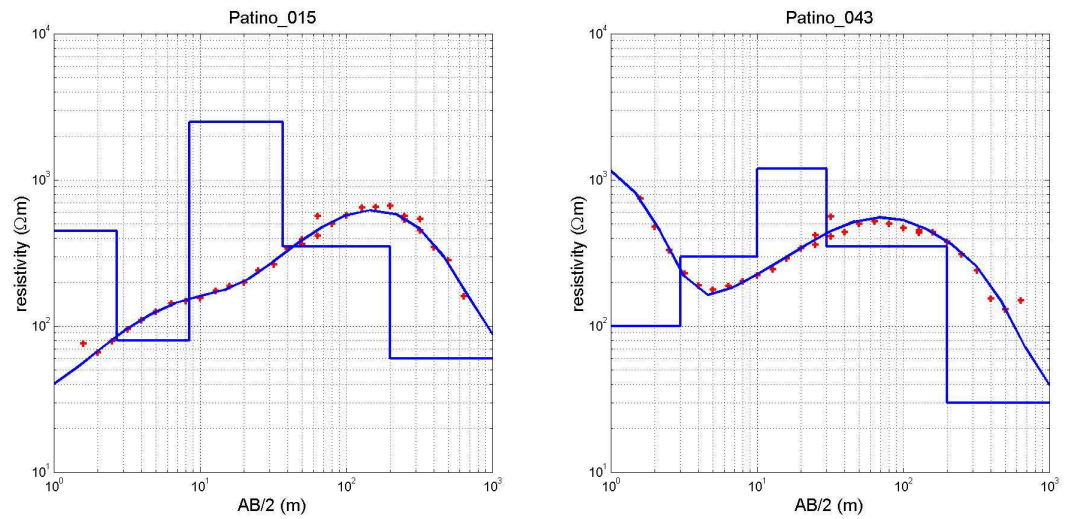


Figura 8-1: Los sondeos geoelectricos en el área recomendado para la perforación exploratoria.

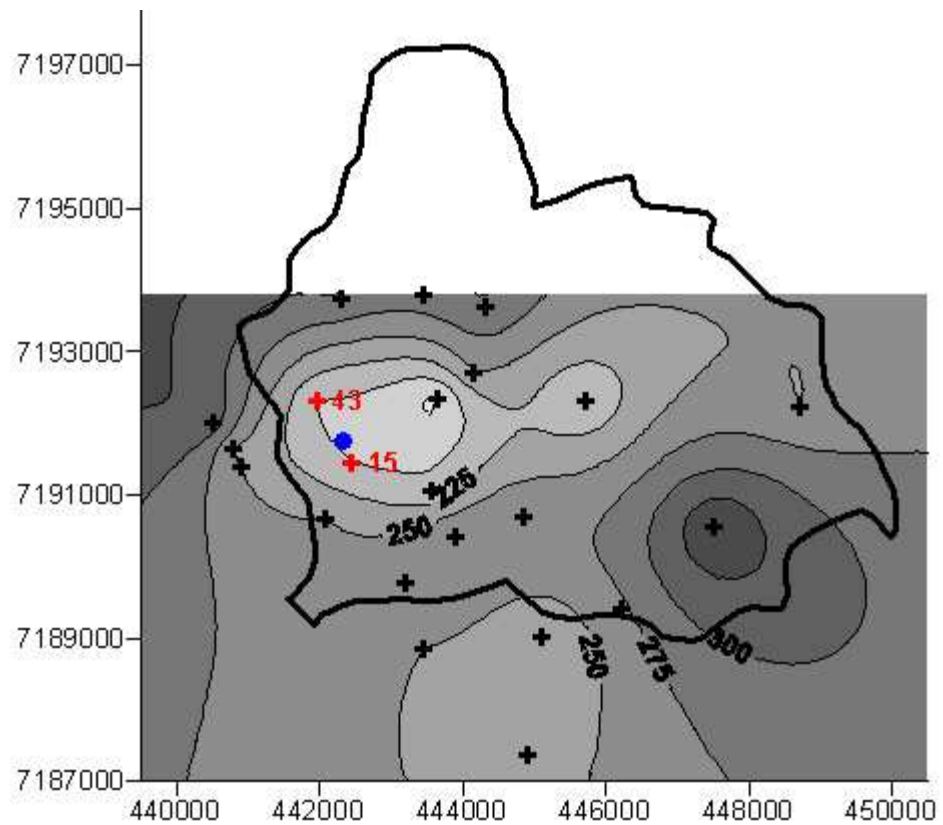


Figura 8-2: Mapa con la ubicación del sitio recomendado para el pozo exploratorio profundo y los sondeos cercanos.

2. Se recomienda perforar un pozo exploratorio somero para definir la naturaleza de las capas de baja resistividad encontradas en los SEV 41 y 49. Esta perforación, que puede ser realizada en cualquier de los dos sitios, debe tener una profundidad de 60 m.
3. Se recomienda realizar perfilajes geofísicos con todos los registros posibles (resistividad, radiación gamma, potencial espontáneo, conductividad, temperatura, diámetro) en los pozos exploratorios.

8.2 Sondeos geoelectricos adicionales

Se recomienda efectuar sondeos geoelectricos adicionales; para (a) llenar lagunas en la zona de estudio, (b) precisar más el limite entre la zona de la base conductiva y la zona donde falta esta capa, (c) obtener curvas en áreas donde los SEV medidos son de calidad insuficiente. En concreto:

1. Se recomienda ejecutar SEV adicionales en el norte de la zona, donde los dos sondeos efectuados son de mala calidad (véase sección 5.4.4). Tentativamente los dos sondeos, SEV 26 y 27 han sido interpretados con un modelo sin la base de baja resistividad. Sondeos adicionales en este sector deben confirmar la validez de esta suposición.
2. Se recomienda ejecutar unos sondeos en la cercanía del SEV 5 en el Este de la zona de estudio. El sondeo parece indicar la base de baja resistividad. Sin embargo, los sondeos cercanos no indican esta capa y existe una duda en la calidad del SEV 5.
3. Otro sondeo anómalo es el SEV 29 al otro lado de la zona de estudio, en el extremo oeste. En la curva del sondeo parece faltar la base de baja resistividad, como se espera en este sector y como está presente en los sondeos cercanos. Aunque el SEV 29 queda un poco afuera de la zona piloto, se recomienda ejecutar unos sondeos adicionales en este lugar, para aclarar si efectivamente hay un cambio lateral y posiblemente una falla. Otra posibilidad es que las altas resistividades aparentes de la curva están producidas por una intrusión a una mayor profundidad.
4. Se recomienda hacer unos sondeos adicionales al Norte del Cerro Patiño, entre los SEV 36 y 41 para estudiar la posible conexión entre estos dos lugares de rocas ígneas.

8.3 Perfiles geoelectricas ('calicatas eléctricas')

Se recomienda efectuar unos perfiles geoelectricas ('calicatas eléctricas') adicionales en los sitios de extrema baja resistividad medida a poca profundidad, quiere decir cerca de los SEV 41 y 49. El objetivo de estos perfiles es de delinear al área y determinar la forma de estas zonas anómalas.

8.4 Mediciones magnetométricas

Se recomienda mapear la extensión de las intrusiones de roca ígnea mediante la medición de unos perfiles magnetométricos. Unos perfiles deben ser ejecutados en las zonas donde los sondeos geoelectricos marcaron estas intrusiones, por ejemplo cerca de los SEV 31, 30 y 12, y en la zona alrededor de los SEV 41, 33, 42 y 9. Otro perfil interesante seria un perfil entre este ultimo sector y el área alrededor del cerro Ñemby, para estudiar la conexión entre las dos zonas. Finalmente, se recomienda realizar un perfil magnetométrico entre los SEV 10, 25 y 21, donde ocurren resistividades relativamente altas, sin que se ha comprobado la presencia de intrusivas en esta parte.

9 Agradecimientos

En la ejecución del trabajo de campo participaron por parte del Departamento de Recursos Hídricos de SENASA, el Lic. geólogo/geofísico Humberto Villalba y el ayudante geofísico, Sr. Gregorio Ferreira, quienes fueron asistidos por dos auxiliares de campo, los señores Hugo Segovia y Rafael Riveras.

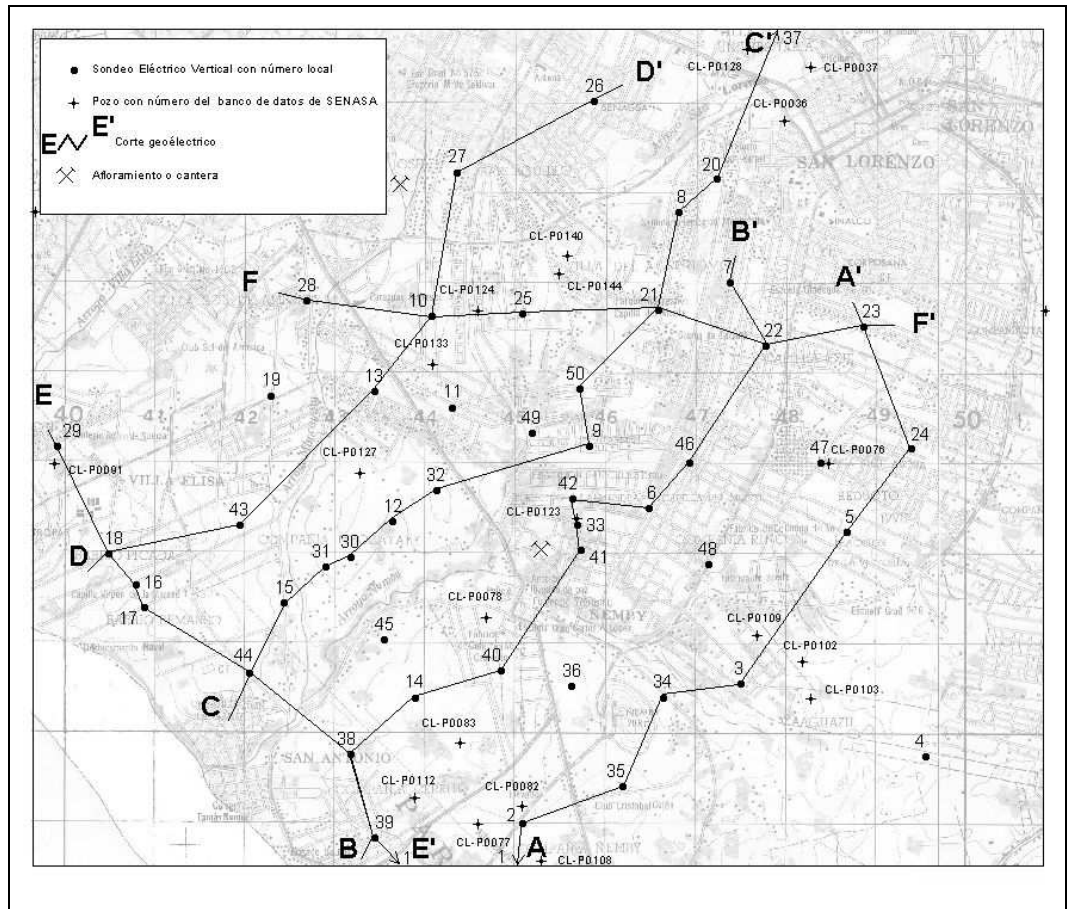
Los perfiles y varios de los mapas del presente informe han sido preparados por los señores Ovidio Grommeck (SENASA) y Wim van der Linden (TNO). Carlos Molano (Hidrogeocol Ltd.) preparó el mapa base del área piloto en Surfer y preparó la lista de los pozos profundos.

10 Referencias bibliográficas

- Astier, J. L., 1971. Geofísica aplicada a la hidrogeología. Masson y Cia, Paris.
- Bartel, W. & Muff, R., 1995. Observaciones geológicas de Paraguay Central en relación al agua subterránea. Memorias del 2º simposio sobre aguas subterráneas y perforación de pozos en el Paraguay, 20 al 24 de Noviembre de 1995, San Lorenzo, Paraguay.
- Geoconsult S.A., 1995. Estudio geoelectrico realizado para la planta de Coca Cola. Informe Interna Coca Cola.
- Godoy V, E., 1991. Acuíferos potenciales del Paraguay. Memorias del 1º simposio sobre aguas subterráneas y perforación de pozos en el Paraguay, 22 a 26 de Julio de 1991, Asunción, Paraguay.
- Gomez Duarte, D.R., 1991. Consideraciones morfoestructurales y estratigráficas de la antiforma de Asunción y su relación con la explotación de aguas subterráneas. Memorias del 1º simposio sobre aguas subterráneas y perforación de pozos en el Paraguay, 22 a 26 de Julio de 1991, Asunción, Paraguay.
- Kearey, P. & Brooks, M., 1991. An introduction to geophysical exploration. Blackwell Scientific Publications (2nd edition), Oxford, 254 p.
- Molano, C., 2000. Inventario de pozos y manantiales en la zona piloto. Informe técnico del proyecto FEHS 2.5.
- Overmeeren, R.A. van, 1989. Aquifer boundaries explored by geo-electrical measurements in the coastal plain of Yemen: a case of equivalence. *Geophysics*, 54, pp. 38-48.
- Overmeeren, R.A. van, 1991. Geofísica para la exploración de aguas subterráneas; un curso práctico. Parte 6: El método de resistividad eléctrica. Netherlands Institute of Applied Geophysics – *National Geological Survey*, Delft, The Netherlands, 96 pp.
- Villalba, H., 1998a. Informe de mediciones geoelectricas en la localidad Ñemby. Informe del Ministerio de Salud Publica y Bienestar Social, Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental – SENASA, Departamento de Recursos Hídricos.
- Villalba, H., 1998b. Informe de mediciones geoelectricas en la localidad Pai Ñu. Informe del Ministerio de Salud Publica y Bienestar Social, Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental – SENASA, Departamento de Recursos Hídricos.

**Anexo A Los sondeos eléctricos verticales (SEV) y su
interpretación**

Anexo B Mapa base



Anexo C Leyenda de los cortes geoelectricos

