



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA EN EL VALLE DE PAN DE AZÚCAR, REGIÓN DE COQUIMBO

INFORME FINAL

**REALIZADO POR:
GEODATOS SAIC**

S.I.T. N° 443

Santiago, Diciembre, 2019

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Sr. Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas
Ingeniero Comercial Sr. Oscar Cristi Marfil

Jefa (S) División de Estudios y Planificación
Ingeniera Civil Srta. Andrea Osses Vargas

Inspector Fiscal
Ingeniera Agrícola Pamela García Serrano

GEODATOS SAIC

Jefe Proyecto
Geofísico Sénior Sr. Juan Carlos Parra E.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 TRABAJO DE TERRENO.....	3
2.1 INSTRUMENTAL.....	11
2.1.1 Instrumental TEM.....	11
2.1.2 Instrumental Perfilaje Geofísico.....	12
3 ANTECEDENTES.....	13
4 DESCRIPCIÓN MÉTODOS GEOFÍSICOS	15
4.1 MÉTODO TEM.....	15
4.1.1 Aspectos Generales del Método	15
4.1.2 Inversión 1D.....	16
4.2 MÉTODO PERFILAJE GEOFÍSICO	17
4.2.1 Aspectos Generales de Sonda Rayos Gamma	17
4.2.2 Aspectos Generales de Sonda Densidad de Formación.....	18
4.2.3 Aspectos Generales de Sonda Dual-Neutrón	19
4.2.4 Proceso de Datos, Diagrafías.....	20
5 RESULTADOS.....	21
5.1 RESULTADOS TEM.....	21
5.1.1 Secciones de Resistividad TEM.....	21
5.1.2 Secciones de Interpretación.....	28
5.2 Resultados Perfilaje Geofísico	32
6 INTERPRETACIÓN DE ANTECEDENTES.....	35
7 CURSO DE CAPACITACIÓN DE GEOFÍSICA APLICADA A LA HIDROGEOLOGÍA.....	37
7.1 Objetivo General.....	37
7.2 Contenidos.....	37
7.3 Actividades.....	42
8 CONCLUSIONES.....	46
9 BIBLIOGRAFÍA.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Disposición en Planta de la Información Recopilada y Generada.....	6
Figura 2 Fotografías de Terreno, Perfilajes No medidos.....	9
Figura 3 Fotografías de Terreno.....	10
Figura 4 Sección de resistividad TEM, perfil L1 modelo de capas.....	22
Figura 5 Sección de resistividad TEM, perfil L2 modelo de capas.....	22
Figura 6 Sección de resistividad TEM, perfil L3 modelo de capas.....	23
Figura 7 Sección de resistividad TEM, perfil L4 modelo de capas.....	23
Figura 8 Sección de resistividad TEM, perfil L9 modelo de capas.....	24
Figura 9 Sección de resistividad TEM, perfil L10 modelo de capas...	24
Figura 10 Sección de resistividad TEM, perfil L1 modelo suavizado...	25
Figura 11 Sección de resistividad TEM, perfil L2 modelo suavizado...	25
Figura 12 Sección de resistividad TEM, perfil L3 modelo suavizado...	26
Figura 13 Sección de resistividad TEM, perfil L4 modelo suavizado...	26
Figura 14 Sección de resistividad TEM, perfil L9 modelo suavizado...	27
Figura 15 Sección de resistividad TEM, perfil L10 modelo suavizado...	27
Figura 16 Sección de interpretación, perfil L1.....	29
Figura 17 Sección de interpretación, perfil L2.....	29
Figura 18 Sección de interpretación, perfil L3.....	30
Figura 19 Sección de interpretación, perfil L4.....	30
Figura 20 Sección de interpretación, perfil L9.....	31
Figura 21 Sección de interpretación, perfil L10.....	31
Figura 22 Diagrafía Perfilaje Geofísico, Hijuelas Santa Elena.....	33
Figura 23 Diagrafía Perfilaje Geofísico, Lo Martínez.....	34
Figura 24 Perfil Gravimétrico LG 13 modificado de GCF (2015)	35
Figura 25 Perfil de Interpretación de Sección de Resistividad TEM E20 extraído de GCF (2015)	36
Figura 26 Perfil de Interpretación de Sección de Resistividad TEM E73 extraído de GCF (2015)	36
Figura 27 Primer día de capacitación, donde se realiza el módulo 1 del curso	43
Figura 28 Segundo día de capacitación, donde se realizan los módulos 2,	

	3a y 3b del curso	44
Figura 29	Tercer día de capacitación, donde se realizan los módulos 3c, 3d y 4 del curso	45
Figura 30	Secciones de Resistividad TEM Interpretadas y desplegadas en planta	47

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.	Coordenadas y tamaños de loop Estaciones Geofísicas..... 3
Tabla 2.	Pozos de Aguas del Valle donde se planificó realizar el Perfilaje Geofísico..... 5
Tabla 3.	Pozos de Monitoreo de la DGA donde se planificó realizar el Perfilaje Geofísico..... 5
Tabla 4.	Resumen de las sondas empleadas, metraje perfilado, coordenadas y cotas de cada uno de los pozos del presente estudio..... 8
Tabla 5.	Detalle de los parámetros y sus unidades medidos por cada una de las sondas empleadas en el presente estudio... 8
Tabla 6.	Parámetros metodología TEM..... 11
Tabla 7.	Información Recopilada de SNIA..... 14
Tabla 8.	Cronograma de las actividades realizadas en el curso..... 39
Tabla 9.	Listado de participantes del curso y status de aprobación 40

ANEXOS

Anexo A	Ubicación General del Área de Estudio
Anexo B	Fichas Resumen de Estudios
Anexo C	Modelos 1D TEM
Anexo D	Presentaciones del Curso de Capacitación en Geofísica Aplicada a la Hidrogeología

1 INTRODUCCIÓN

Dirección general de aguas (DGA), solicitó a Geodatos S.A.I.C. efectuar el estudio “Levantamiento y Análisis de Información Geofísica en el Valle de Pan de Azúcar, Región de Coquimbo”, el cual consiste en la revisión, recopilación y análisis de antecedentes geofísicos existentes y la generación de nueva información geofísica que permita caracterizar las unidades hidrogeológicas presentes en un sector del acuífero del Valle de Pan de Azúcar, comuna de Coquimbo.

Como objetivos específicos se cuentan:

1. Recopilación y análisis de antecedentes.
2. Representar y estimar los flujos de agua subterránea.
3. Determinar y caracterizar las unidades hidrogeológicas presentes: unidades acuíferas y acuitardos.
4. Generar información litológica de los pozos en la zona de estudio.
5. Desarrollo de una base de datos consolidada, representada en un SIG.

Con el fin de definir la geometría de la sección del acuífero en estudio, se realizó una recopilación de antecedentes e interpretación de perfiles estratigráficos y prospecciones geofísicas.

La generación de nueva información geofísica estuvo orientada a la aplicación de dos técnicas geofísicas: el Transiente Electromagnético (TEM) y el Perfilaje Geofísico de Pozos.

Transiente Electromagnético (TEM): Con esta metodología se logró diferenciar y delimitar unidades conductoras o resistivas en profundidad, se utilizó un loop de 100x100 m con lo que se obtuvo una profundidad de investigación de aproximadamente 300 m para este Estudio.

Los resultados obtenidos se presentan en modelos de resistividad 1D, generados con el sistema de inversión de modelo de capas y el sistema de inversión Smooth Model (Modelos Suavizados). Estos modelos son agrupados en perfiles y presentados como secciones de resistividad 2D.

Perfilaje Geofísico de Pozos: Las sondas usadas en este estudio fueron las siguientes:

- Sonda de fuente Radiactiva que mide Densidad, Gamma Natural y Caliper.
- Sonda de fuentes radiactiva Neutrón-Neutrón y Dual-Neutrón que miden la porosidad.

Las que permiten obtener una distribución de porosidad y densidad en profundidad, el análisis de estos datos permite detectar unidades de arena y correlacionar características estratigráficas.

Debido a la presencia de revestimiento metálico en los pozos utilizados se descartaron las mediciones con la Sonda de Inducción Dual de Resistividad Electromagnética.

2 TRABAJO DE TERRENO

La adquisición de datos TEM se realizó los días 25, 26 y 27 de septiembre, donde se midieron 33 estaciones. Las coordenadas de las estaciones geofísicas se presentan en proyección UTM (Universal Transverse Mercator) referidas al sistema geodésico WGS84 Huso 19 Sur (Tabla 1) y fueron medidas por operadores de terreno con receptores GPS (no diferencial).

Tabla 1. Coordenadas y tamaños de Loop Estaciones Geofísicas.

Este	Norte	Estación	Cota [m]	Perfil
281.454	6.671.531	1	113	1
282.165	6.671.550	2	116	1
282.657	6.671.653	3	117	1
283.136	6.671.671	4	125	1
283.747	6.671.667	5	125	1 y 10
284.348	6.671.803	6	136	1 y 9
284.777	6.671.808	7	140	1
281.782	6.670.479	8	119	2
282.275	6.670.544	9	118	2
282.824	6.670.678	10	121	2
283.343	6.670.685	11	120	2
283.985	6.670.617	12	125	2 y 10
284.419	6.670.843	13	129	2 y 9
285.047	6.670.875	14	138	2

Este	Norte	Estación	Cota [m]	Perfil
281.908	6.669.536	15	124	3
282.400	6.669.637	16	121	3
283.000	6.669.616	17	125	3
283.510	6.669.651	18	126	3
283.970	6.669.649	19	127	3 y 10
284.489	6.669.782	20	130	3 y 9
285.224	6.669.793	21	142	3
283.623	6.668.653	25	127	4
283.946	6.668.668	26	133	4 y 10
284.432	6.668.723	27	133	4
285.080	6.668.889	28	141	4 y 9
283.490	6.671.146	101	123	10
284.332	6.671.252	102	131	9
283.829	6.670.219	103	121	10
284.402	6.670.284	104	133	9
283.850	6.669.154	105	129	10
284.681	6.669.290	106	131	9
284.238	6.667.735	107	130	10
285.081	6.667.841	108	127	9

El perfilaje de pozos se programó para ser realizado considerando una lista de pozos entregados por DGA, información que se muestra en la Tabla 2. Estos pozos pertenecen a Aguas del Valle.

Tabla 2. Pozos de Aguas del Valle donde se planificó realizar el Perfilaje Geofísico.

N°	Nombre	Coordenada Norte	Coordenada Este	Profundidad (m)
1	Pozo Interior N° 1	6.667.914	284.785	63
2	Pozo Interior N° 2	6.667.718	284.856	100
3	Pozo Interior N° 3	6.667.748	284.590	61
4	Pozo Pan de Azúcar N° 1	6.670.101	283.816	80
5	Pozo Pan de Azúcar N° 2	6.670.355	283.701	80
6	Pozo el Peñón	6.664.108	285.746	118

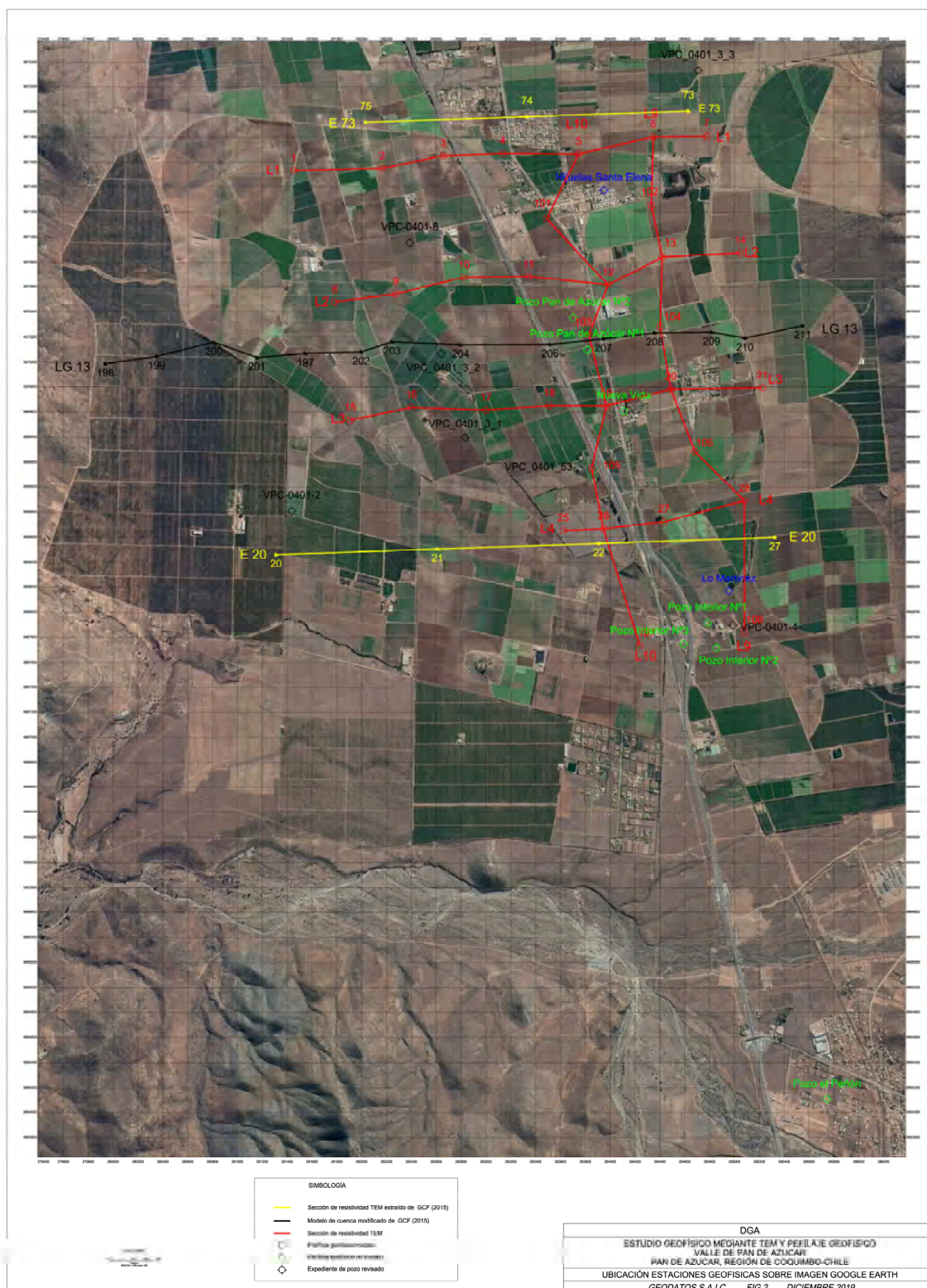
Además, la DGA entregó una lista de pozos de monitoreo operativos, en los cuales, según la cercanía con la zona de estudio, se podría solicitar acceso para realizar el perfilaje. Luego de conversar con el Jefe Regional de Zona se estableció una lista de pozos donde era posible realizar el sondeo, indicados en la Tabla 3.

Tabla 3. Pozos de Monitoreo de la DGA donde se planificó realizar el Perfilaje Geofísico.

N°	Nombre	Código	Coordenada Norte	Coordenada Este	Profundidad (metros)
1	Nueva Vida	04400022-9	6.669.608	284.110	65
2	Lo Martinez	04400031-8	6.668.170	284.955	74
3	Hijuelas Santa Elena P.A.	04400008-3	6.671.372	283.949	Sin antecedentes

La posición de las estaciones TEM y los pozos para Perfilaje Geofísico están dispuestos en planta como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Disposición en Planta de la Información Recopilada y Generada.



Las coordinaciones para realizar el perfilaje geofísico en los 9 pozos mencionados en las Tablas 2 y 3 se llevaron a cabo entre los días 2 de octubre y 12 de noviembre, días en los cuales se consultó sobre las características del pozo (revestimiento y posibilidad de ingresar una sonda por la boca de pozo) y se solicitaron contactos para llegar a la posición donde se encontraba cada pozo.

El día 25 de octubre se intentó coordinar una visita a la zona para el día 26 de octubre, la cual fue rechazada debido a que Aguas del Valle no tenía trabajadores disponibles que ayudaran con el acceso a los pozos para el día en el que se solicitaba realizar la visita.

El día 12 de Noviembre se contactó al encargado para coordinar una visita y realizar el perfilaje geofísico en los pozos solicitados, sin embargo se indicó que por una baja productividad de agua en la zona todos los pozos estaban siendo utilizados de manera simultánea, por lo que no se podía realizar el perfilaje en los pozos dicho día, se estableció que el día 14 de Noviembre el encargado avisaría a Geodatos sobre la posibilidad de desocupar alguno de los pozos de producción para poder realizar las mediciones con la sonda geofísica. El día 14 de noviembre el equipo de terreno se dirigió a la zona de estudio, previa confirmación, para concretar las mediciones, al visitar los pozos de producción de Aguas del Valle el equipo encontró los pozos sin posibilidad de ingresar una sonda que permitiera realizar el perfilaje geofísico, como se indica en la Figura 2. misma situación ocurrió con el pozo de monitoreo de la DGA “Nueva Vida”.

Para sustituir estas mediciones faltantes, se realizó una capacitación de Geofísica aplicada a la Hidrogeología, la cual se detalla en el Capítulo 7.

Los pozos donde se estableció que era factible realizar el perfilaje geofísico fueron los pozos de monitoreo de la DGA “Hijuelas de Santa Elena” y “Lo Martínez”, mediciones que fueron realizadas el día 17 de noviembre.

La profundidad de investigación, sondas empleadas, coordenadas referidas al Datum WGS84 UTM Huso Zona 19S y cotas para cada uno de los pozos se especifican en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen de las sondas empleadas, metraje perfilado, coordenadas y cotas de cada uno de los pozos del presente estudio.

Código BNA	Nombre Pozo	Este [m]	Norte [m]	Cota[m]	Sondas empleadas	Metraje Perfilado [m]
04400031-8	Lo Martínez	284.955	6.668.170	127	Densidad	72
					Dual-Neutrón	72
04400008-3	Hijuelas Santa Elena P.A (Hijuelas)	283.949	6.671.372	132	Densidad	42
					Dual-Neutrón	42

Las sondas empleadas fueron las sondas Densidad y Dual-Neutrón, las cuales miden los parámetros descritos en la Tabla 5.

Tabla 5. Detalle de los parámetros y sus unidades medidos por cada una de las sondas empleadas en el presente estudio.

Sonda	Parámetros	Unidades
Densidad (SSDS)	Densidad	gr/cc
	Caliper	Pulgadas
	Gamma Natural	API
Dual-Neutrón (DNNS)	Porosidad	LPU

El personal de campo estuvo formado por un operador geofísico especializado y un grupo de ayudantes técnicos. El equipo de apoyo logístico está formado por 1 vehículo 4WD e instrumental GPS.

Figura 2. Fotografías de terreno, Perfilajes No medidos.

a) El Peñón



b) Pan de Azúcar 1



c) Pan de Azúcar 2



d) Pozo Interior 1



e) Pozo Interior 2



f) Pozo Interior 3

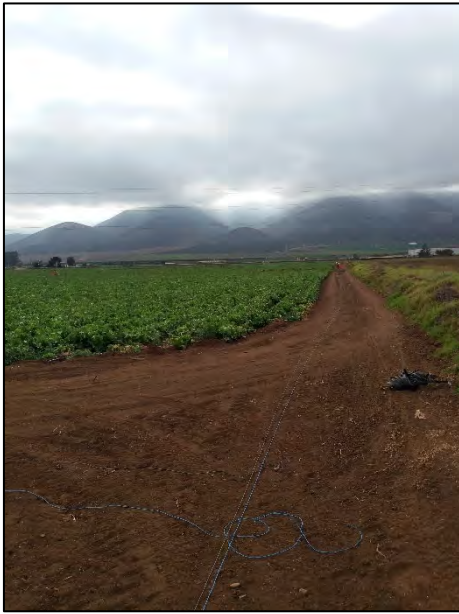


g) Nueva Vida



Figura 3. Fotografías de Terreno.

a) Estación TEM 6



b) Estación TEM 9



c) Perfilaje Geofísico en “Las Hijuelas”



d) Perfilaje Geofísico en “Lo Martínez”



2.1 INSTRUMENTAL

2.1.1 Instrumental TEM

El equipo de apoyo técnico incluye computadora portátil y radios de intercomunicación. El equipo geofísico de adquisición de datos de transiente electromagnético es marca Zonge Engineering and Research Organization, y está compuesto por:

- Receptor digital multipropósito modelo GDP-32
- Transmisor TEM modelo ZT-30. con baterías como fuente de energía
- Computador de campo y equipo de apoyo

El receptor funciona en un intervalo de frecuencias desde DC hasta 8 KHz y puede ser utilizado para métodos eléctricos y electromagnéticos como TEM, NanoTEM, IP (en los dominios del tiempo y de la frecuencia), CSAMT, AMT, etc. El instrumento posee filtros digitales controlados por software. Los datos son grabados en la memoria de estado sólido del receptor y transferibles electrónicamente a computadoras.

Las mediciones de TEM se obtuvieron con la configuración “loop coincidente”, en la cual la antena transmisora es una espira cuadrada de cable aislado desplegada sobre la superficie del terreno. La antena receptora corresponde a otra espira de dimensiones similares con el cable tendido paralelamente al anterior. Los parámetros se presentan en la Tabla 6:

Tabla 6. Parámetros Metodología TEM.

Frecuencias de repetición	Intervalo binario de 0,5; 1; 2; 4; 8; 16 y 32 Hz
Configuración	‘Coincident Loop’
Antena transmisora	Espira cuadrada de 100 x 100 m y 50 x 50 m
Antena receptora	Espira cuadrada de 100 x 100 m y 50 x 50 m
Variable medida	Componente vertical del campo magnético

2.1.2 Instrumental Perfilaje Geofísico

Los equipos de adquisición y procesamiento de datos de las diagráfias son de la marca *Robertson Geologging*:

1. RG USB Micrologger 2

Con una nueva interfaz USB para computador portátil y soporte de video. Micrologger 2 es actualmente el sistema de registro portátil más poderoso del mercado. Es liviano, más pequeño que una computadora portátil común.

2. RG Winlogger Software

En el centro del Micrologger 2 se encuentra el software RG-Winlogger producto obtenido del desarrollo de veinte años de trabajo, es una solución de fácil uso con base en WindowsTM, para la recolección, procesamiento e informe de datos de registro.

3. RG 500m Winch

Cabrestante eléctrico de 500 metros de cable, con interfaz digital de comunicación con sistema Micrologger 2.

3 ANTECEDENTES

Se consultaron las siguientes fuentes de información para recopilar y analizar antecedentes:

- Estudio Geofísico e Hidrogeológico en la Zona Baja de la Cuenca del río Elqui y en la Zona de Pan de Azúcar, desarrollado por GCF Ingenieros para CORFO. Informe de Junio de 2015.
- Estudio hidrogeológico Cuenca Pan de Azúcar: Provincia de Elqui, IV Región Chile / dirección y coordinación del estudio Eduardo Rozas Elgueta, Universidad Técnica del Estado La Serena, Instituto de Investigaciones, 1979
- Control y Evaluación de Recursos Hídricos Subterráneos, IV Región /Gobierno Regional, Región de Coquimbo, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación, realizado por AC Ingenieros Consultores, 1998.
- Aplicación del Modelo Hidrogeológico Valle Pan de Azúcar / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación, 2004.
- Sistema Nacional de Información de Aguas (SNIA)

Se extrajo de GCF (2015) los perfiles gravimétricos y de resistividad ubicados en la zona de estudio. Estos corresponden a las secciones de resistividad TEM E20 y E73 y el perfil gravimétrico L13, renombrado como LG13 para este informe.

En el SNIA se buscaron derechos y solicitudes referentes a pozos ubicadas dentro de la zona estudiada, se extrajo información de los siguientes expedientes:

- VPC-0401-2
- VPC-0401-4
- VPC-0401-3
- VPC-0401-8
- VPC-0401-53

El expediente VPC-0401-3 contiene 4 pozos, de los cuales los pozos N°1, 2 y 3 se encuentran en el área de estudio. Estos fueron nombrados pozo VPC-0401-3_1, VPC-0401-3_2 y VPC-0401-3_3 respectivamente.

La información del pozo N°2 contenido en el expediente VPC-0401-3 entrega información del espesor sedimentario mínimo existente en dicha ubicación, el expediente VPC-0401-2 hace referencia a un pozo donde se alcanzó roca de basamento en la perforación por lo que entrega información del espesor sedimentario presente en la ubicación del pozo.

Esta información se utilizó como puntos de control para remodelar el perfil gravimétrico 13 extraído de GCF (2015).

Los expedientes con código VPC-0401-4 y VPC-0401-8 contienen una clasificación de los estratos observados en la perforación de los pozos referidos en cada expediente, esta información se utilizó para corroborar los resultados obtenidos del perfilaje geofísico realizado en los pozos Hijuelas Santa Elena y Lo Martinez.

La información referente a los pozos N°1 y N°3 del expediente VPC-0401-3 y el pozo contenido en el expediente VPC-0401-53 sirvió como un espesor sedimentario mínimo presente en las posiciones de los pozos.

Esta información se resume en la Tabla 7.

Tabla 7. Información recopilada de SNIA

Expediente	Espesor sedimentario mínimo (m)	Profundidad roca (m)	Litología
VPC-0401-2	100	100	Si
VPC-0401-3_1	90	No	No
VPC-0401-3_2	95	No	No
VPC-0401-3_3	89	No	No
VPC-0401-4	100	No	Si
VPC-0401-8	100	No	Si
VPC-0401-53	120	No	No

4 DESCRIPCIÓN MÉTODOS GEOFÍSICOS

4.1 MÉTODO TEM

4.1.1 Aspectos Generales del Método

La técnica de TEM (Transiente Electromagnético) corresponde a métodos electromagnéticos de prospección geofísica que funcionan en el dominio del tiempo. Operacionalmente, consisten en la aplicación de una corriente eléctrica variable a una espira de cable aislado desplegado con una forma usualmente cuadrada sobre el terreno. Esta corriente genera un campo magnético (principal) que induce corrientes de conducción en el subsuelo. Luego se interrumpe la corriente y se mide el campo magnético (secundario) generado por las corrientes de conducción, el cual posee una respuesta transiente, es decir, dependiente del tiempo. Este transiente magnético se mide como voltaje inducido en un loop receptor o bobina receptora.

Las corrientes inducidas en el subsuelo se distribuyen en profundidad de acuerdo con el mecanismo físico de difusión y el comportamiento que muestran depende de las resistividades, tamaños y formas de las estructuras geoelectricas subsuperficiales. En zonas de bajas resistividades, la difusión de las corrientes es lenta, con una amplitud inicial pequeña, a diferencia de zonas con altas resistividades, donde se tiene una amplitud inicial mayor, pero el decaimiento es más rápido. El análisis numérico de la curva transiente, o de decaimiento en el tiempo del voltaje registrado, permite inferir información cuantitativa acerca de los parámetros geoelectricos del subsuelo. Ambas técnicas son inductivas, es decir, evita el problema que enfrentan los métodos galvánicos al intentar inyectar corriente directamente al subsuelo en terrenos de muy alta resistencia de contacto; por ejemplo, costras salinas secas superficiales muy resistivas (como el caliche). característico en ciertos lugares del norte chileno.

La curva transiente se mide en una serie intervalos de tiempo (ventanas) de pequeña duración (fracciones de segundo), obteniéndose así datos de resistividad aparente la cual está directamente relacionada al decaimiento de la curva transiente dentro de los intervalos de registro. El equipo de medición genera una corriente alterna de tipo positiva-nula-negativa-nula, registrando el transiente durante los intervalos de corriente transmisora nula.

El método TEM emplea frecuencias de repetición que usualmente fluctúan entre 0,5 y 32 Hz, con paso binario.

En general, este método es apropiado para detectar y visualizar capas conductoras; sin embargo, no tienen buena capacidad para detectar estructuras resistivas subyacentes a estratos muy conductores.

4.1.2 Inversión 1D

La inversión de la curva de resistividad de un sondeo TEM permite obtener las resistividades y espesores de un modelo estratificado del subsuelo (modelo 1D) bajo la estación. La medición de sondeos TEM, a lo largo de una línea posibilita detectar cambios laterales de los parámetros geoelectricos, lo que se puede representar en un perfil o sección (2D) de resistividad.

Para las inversiones de los datos se usó el sistema IX1D de Interpex, el cual posee dos métodos de inversión. El algoritmo 'layered model' permite variar interactivamente un modelo de pocos estratos (modelo de capas reducidas), pero suficiente para un ajuste apropiado de la curva teórica a la observada.

Por su parte, el algoritmo denominado 'smooth model' realiza una inversión semi-automática, entregando un gran número de capas delgadas (modelo de capas múltiples), con una variación relativamente continua de la resistividad.

En ambientes estratificados es más representativo el primer tipo de modelo. Comparativamente, en general el segundo puede contener más detalles de la variación de la resistividad con la profundidad, mientras que el primero puede dar mayor precisión de las profundidades de las interfaces de los estratos.

Los modelos 1D resultantes tras el proceso de los datos, para las estaciones medidas con las modalidades TEM, se presentan en el Anexo C.

4.2 MÉTODO PERFILAJE GEOFÍSICO

4.2.1 Aspectos Generales de Sonda Rayos Gamma

El perfilaje de rayos gamma, denominado también gamma natural total, mide la radiación gamma total que emana de una formación. Una vez que los rayos gamma son emitidos por un isótopo en la formación, progresivamente van reduciendo la energía como el resultado de las colisiones con otros átomos en la roca (dispersión Compton). La dispersión Compton sucede hasta que el rayo gamma es de una energía tan baja que es completamente absorbido por la formación. Por lo tanto, la intensidad de rayos gamma que la sonda mide está en función de:

- La intensidad inicial emitida de rayos gamma, la cual es una propiedad elemental de la composición de una roca.
- La cantidad de dispersión Compton que los rayos gamma encuentran, la cual está relacionada con la distancia entre la emisión gamma y el detector y la densidad del material intervenido.

Las mediciones de rayos gamma detectan variaciones de la radioactividad natural originada principalmente por los productos de la serie de decaimiento de los elementos Uranio-238 (U), Torio-232 (TH) y Potasio-40 (K). El sensor gamma convencional consiste en un sensor muy sensible compuesto de yoduro de sodio con impurezas de talio respaldado por un fotomultiplicador, que es parte de la sonda que se desplaza por el interior del sondaje a una velocidad máxima de 5 [m/minuto].

Es preciso mencionar que la velocidad promedio de la sonda de perfilaje geofísico fue de aproximadamente 3 [m/min], registrando datos a medida que asciende, o desciende a una tasa de muestreo espacial de 1 cm.

Los impactos de los fotones gamma sobre el elemento sensible se cuentan digitalmente y se expresan en cuentas por segundo. La herramienta de rayos gamma posee un radio de investigación de aproximadamente 0,5 m. Se puede detectar rayos gammas en pozos húmedos o secos y en pozos abiertos o entubados, incluso al perfilar por el interior de las barras de perforación. La principal aplicación del perfilaje gamma es la identificación de cambios litológicos, especialmente los asociados al cambio del contenido de potasio en las rocas.

En lo relativo a secuencias sedimentarias. las arcillas, arcillas ricas en compuestos orgánicos y las cenizas volcánicas muestran los valores más altos de rayos gamma y halita anhidrita, carbón, arenas/areniscas limpias, dolomías y calizas tienen los valores más bajos. Sin embargo, se tiene que tener cuidado en no generalizar ya que, por ejemplo, una arena limpia puede contener feldespatos, micas o ambas, o glauconita, minerales pesados, cualquiera de las cuales puede darle a la arena valores más altos de rayos gamma de los que se esperan para una arena limpia.

4.2.2 Aspectos Generales de Sonda Densidad de Formación

La densidad de formación mide la densidad volumétrica de la formación. Su principal uso es para derivar el valor de la densidad total de la formación. La sonda de densidad de formación es un instrumento de radiación inducida, bombardea la formación con radiación y mide cuanta radiación vuelve al sensor. De modo que permite obtener un registro continuo de la densidad de la pared de pozo (es necesario aplicar una corrección constante por efecto del espesor y material del tubo de habilitación).

La sonda consiste en:

- Una fuente radioactiva, en nuestro caso se usa Cobalto-60 (Co).
- Detector de corto rango (SSD), es un detector muy similar a los detectores usados en las sondas de gamma natural, y se encuentra a 7 pulgadas de la fuente.
- Detector de largo rango (LSD), es idéntico al corto, encontrándose a 16 pulgadas de la fuente.

El principio que rige al perfilaje de densidad es la detección de rayos gamma, producto del fenómeno de dispersión Compton, de los fotones gamma generados con una fuente radioactiva normalmente constituida por Cobalto 60, que se ubica en el extremo inferior de la sonda. La intensidad de la radiación recibida en el elemento sensor es inversamente proporcional a la densidad total del medio en el cual se introducen y dispersan los rayos gamma. Las herramientas de densidad frecuentemente utilizan un brazo para mantener la sonda en contacto con la pared del pozo, permitiendo uno de los perfilajes geofísicos de mayor precisión: 0,02 [gr/cc]. Es importante considerar que los cambios en la densidad total son producto de los cambios en el tipo de roca, la porosidad y los factores de construcción y habilitación del pozo.

Esta sonda además permite registrar la emisión gamma natural que es una buena herramienta para discriminar acerca de la presencia de arcillas en la columna estratigráfica.

4.2.3 Aspectos Generales de Sonda Dual-Neutrón

La Sonda Neutrón Dual es sensible principalmente a la cantidad de átomos de hidrógeno que hay en una formación. Es usada primordialmente en la determinación de la porosidad de una formación. La sonda opera mediante el bombardeo de neutrones de alta energía en la formación, perdiendo energía y produciendo rayos gamma de alta energía. Las reacciones de dispersión suceden más eficientemente con los átomos de hidrógeno. Los neutrones de baja energía resultantes o rayos gamma pueden ser detectados y su recuento está relacionado con la cantidad de átomos de hidrógeno de la formación.

En formaciones con una gran cantidad de átomos de hidrógeno, los neutrones se ralentizan y son absorbidos rápidamente y en una corta distancia. El recuento de los neutrones ralentizados o rayos gamma capturados es menor en la sonda. Por lo tanto, el recuento será menor en rocas altamente porosas.

En formaciones con una pequeña cantidad de átomos de hidrógeno, los neutrones se ralentizan y son absorbidos lentamente y viajan más lejos a través de la roca antes de ser absorbidos. El recuento de los neutrones ralentizados o rayos gamma capturados en la sonda es, por consiguiente, más alto. Por lo tanto, el recuento será mayor en rocas poco porosas.

La sonda Neutrón-Neutrón se basa en el mismo principio que la Neutrón Dual, sin embargo, ésta sólo posee un detector, reduciendo su resolución. Dicha sonda se utiliza en los casos en el que el pozo a medir es más estrecho que la sonda Neutrón Dual, ya que tiene un diámetro mayor que la Neutrón-Neutrón.

Los principales usos son: indicadores de litología, análisis de fácies y electro-fácies, correlación, determinación de porosidad de arcillas e indicadores de compactación.

4.2.4 Proceso de Datos Diagrafías

Una vez adquiridos los datos en terreno, éstos se representan mediante el software WellCAD de Advanced Logic Technology (ALT).

Mediante dicho software se representan los distintos canales de cada sonda, realizando los ajustes precisos para limitar los efectos provenientes del pozo como son la existencia de casing metálico, doble casing, cribas entre casings, fluidos de perforación, etc.

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS TEM

El objetivo general del presente trabajo geofísico es la determinación cuantitativa de las propiedades eléctricas del subsuelo en la zona de interés, constituido por formaciones sedimentarias y rocas del basamento, las cuales presentan diferentes resistividades, dependiendo de su composición, grado de fracturamiento y alteración. Estas propiedades geoelectricas dependen de la mineralogía (litología) y micro-estructura (porosidad, granulometría, fracturamiento) de las rocas. Afecta de manera importante a la resistividad el tipo de fluidos que contengan las rocas (grado de saturación, salinidad, etc.). La existencia de estructuras y fenómenos de alteración también producen cambios de la resistividad que pueden ser detectados con un estudio geoelectrico.

5.1.1 Secciones de Resistividad TEM

Sobre la base de las figuras que contienen los modelos de resistividad a lo largo del perfil, se realizó una diferenciación de unidades geoelectricas dando continuidad a los modelos de sondeos adyacentes. Desde la Figura 4 a la Figura 9 se muestran las secciones de resistividad de los perfiles de TEM, obtenidas a partir de los modelos 1D, utilizando el sistema de inversión 'layered model', en una representación de grillas de color. En forma análoga, desde la Figura 10 a la Figura 15 se muestran las secciones de resistividad, obtenidas a partir de los modelos 1D, utilizando el sistema de inversión smooth model. La zonificación de colores para la resistividad está en escala logarítmica (para dar cuenta de la gran variación de resistividad), con valores aproximados entre 1 y 1000 [Ohm-m], que abarcan apropiadamente las unidades detectadas.

Figura 4. Sección de resistividad TEM, perfil L1 modelo de capas.

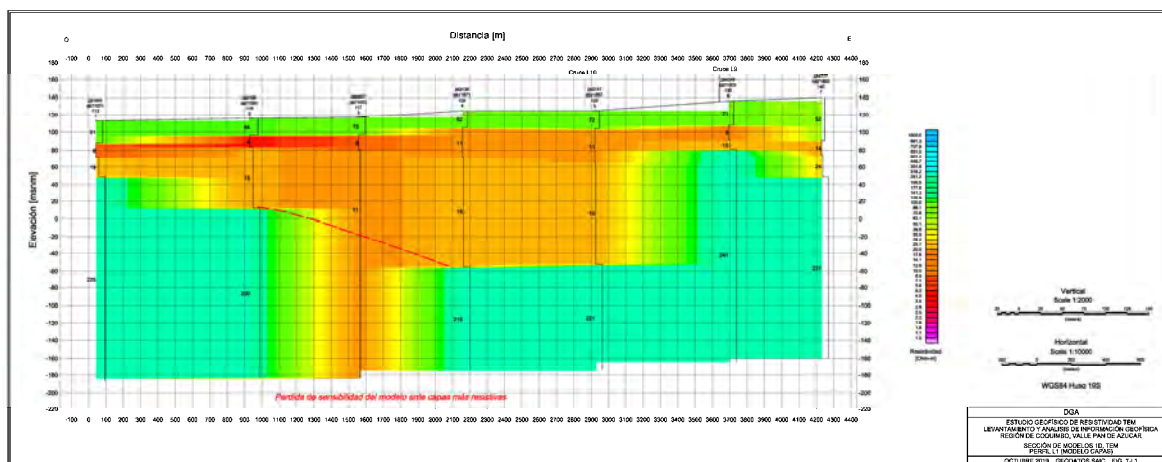


Figura 5. Sección de resistividad TEM, perfil L2 modelo de capas.

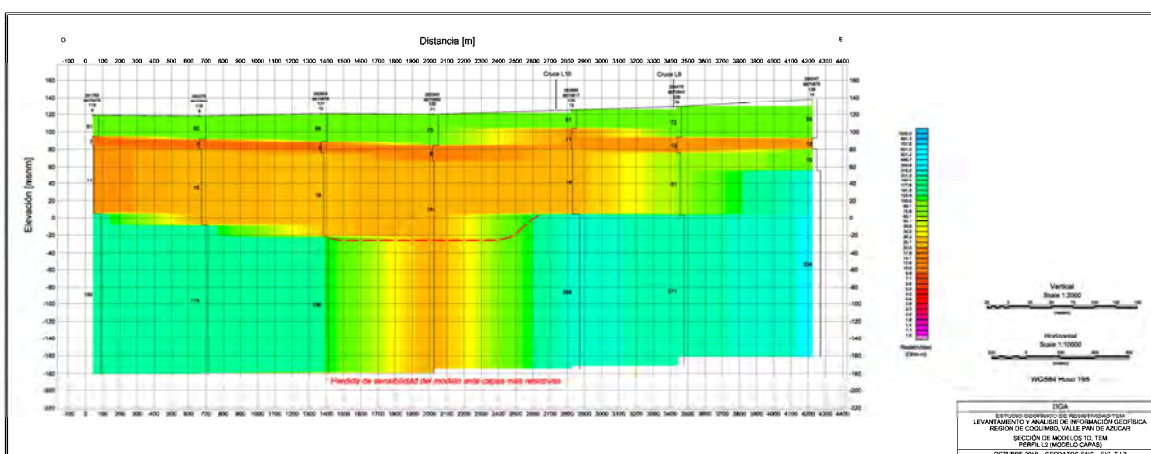


Figura 6. Sección de resistividad TEM, perfil L3 modelo de capas.

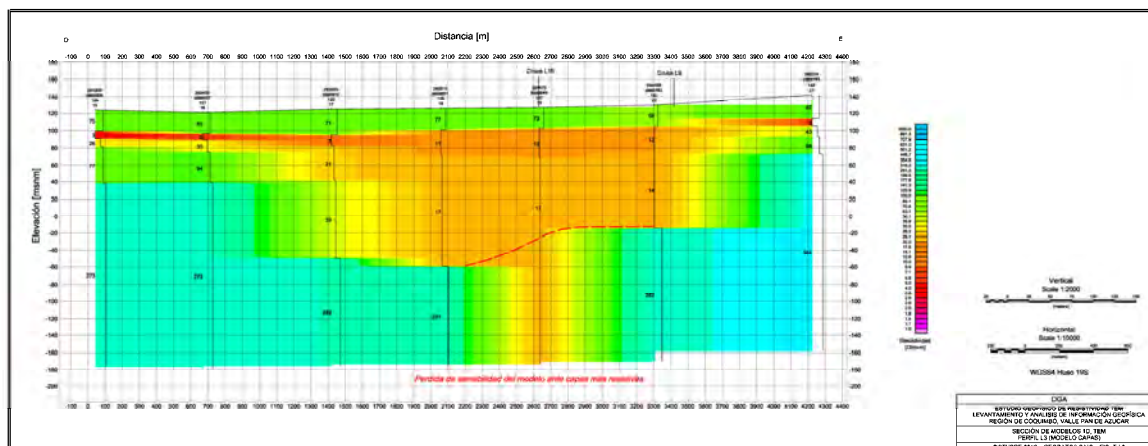


Figura 7. Sección de resistividad TEM, perfil L4 modelo de capas.

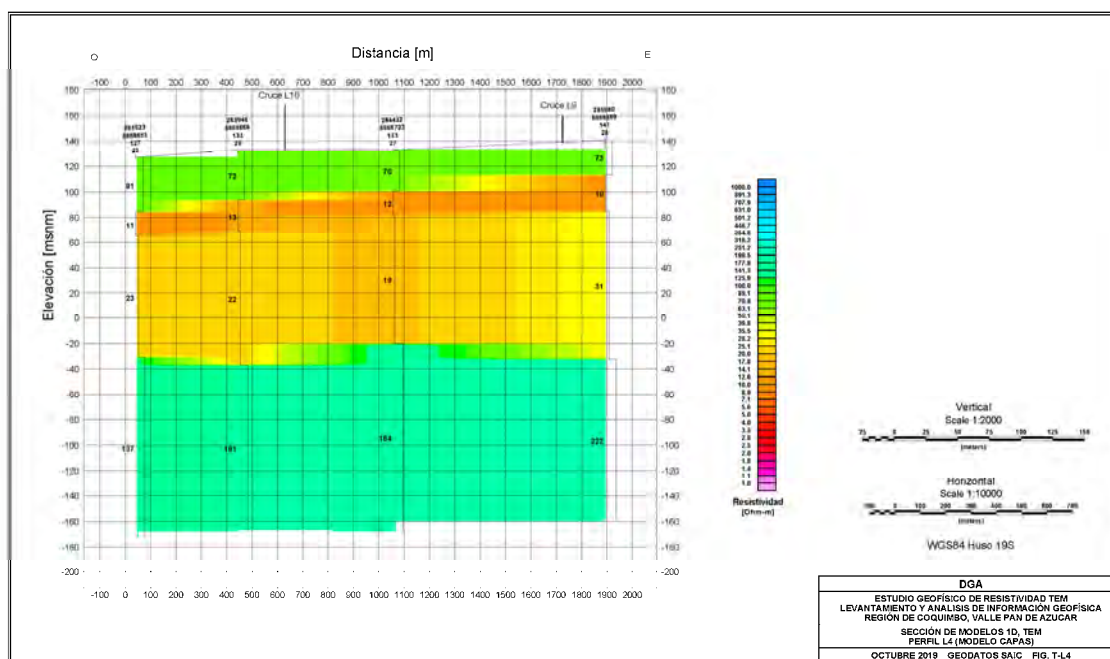


Figura 8. Sección de resistividad TEM, perfil L9 modelo de capas.

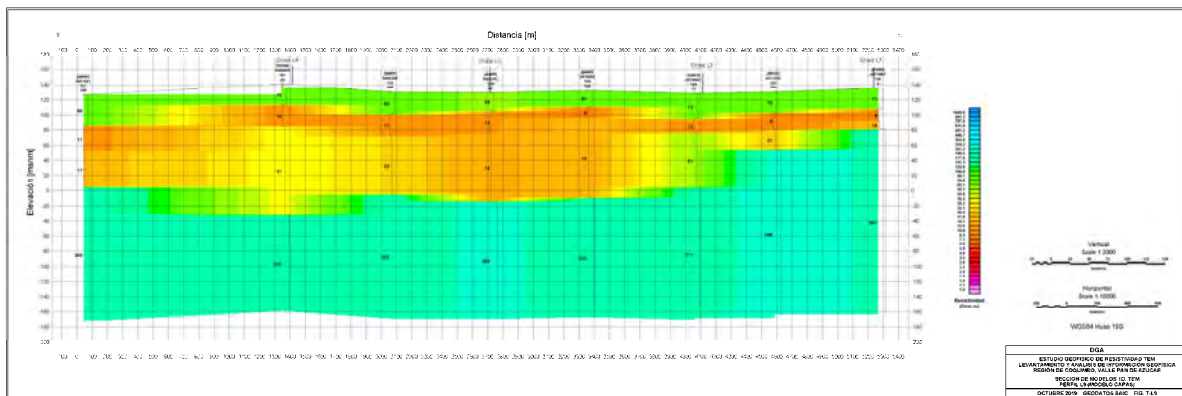


Figura 9. Sección de resistividad TEM, perfil L10 modelo de capas.

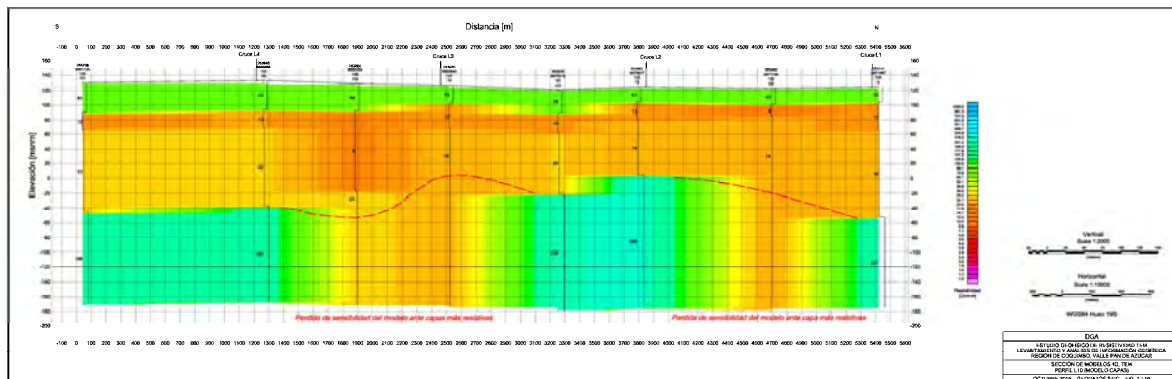


Figura 10. Sección de resistividad TEM, perfil L1 modelo suavizado.

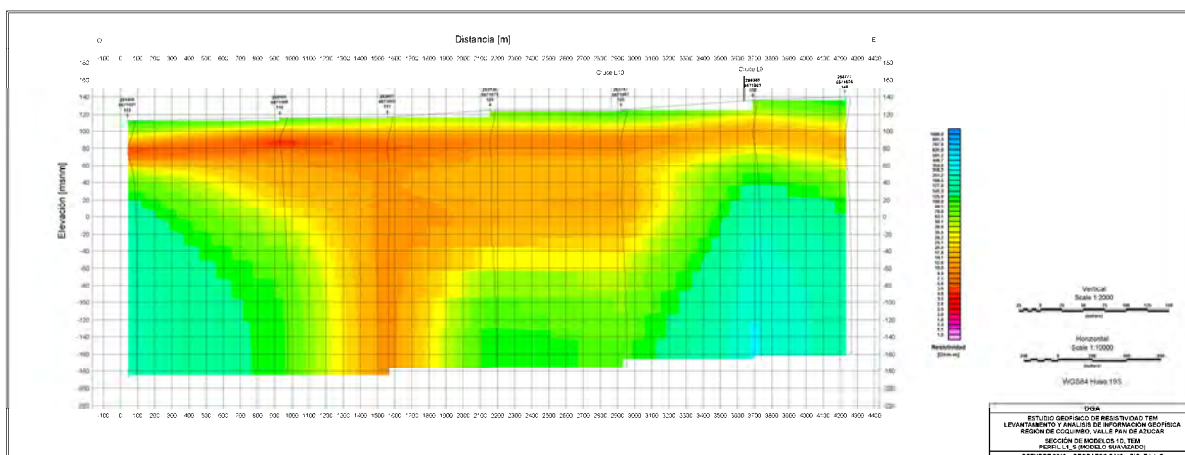


Figura 11. Sección de resistividad TEM, perfil L2 modelo suavizado.

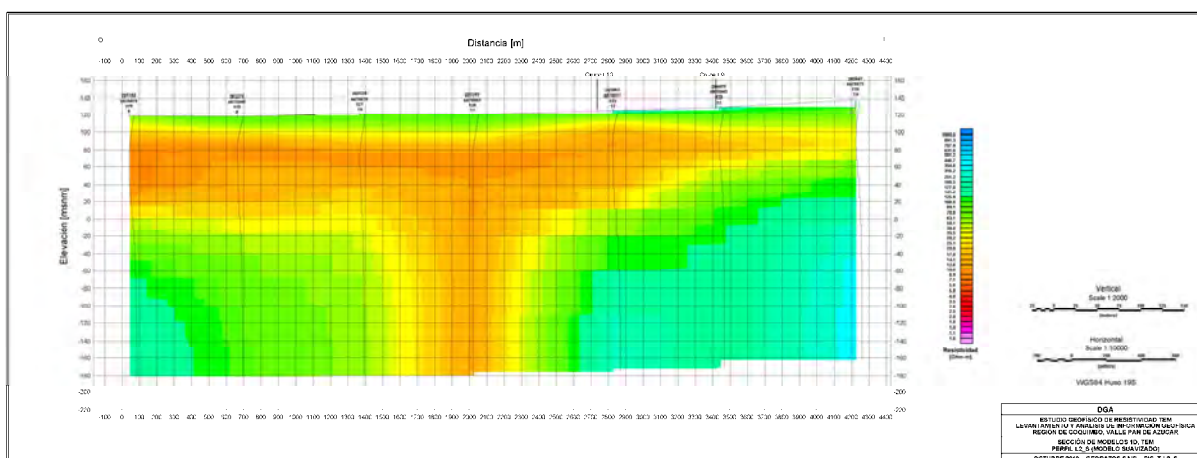


Figura 12. Sección de resistividad TEM, perfil L3 modelo suavizado.

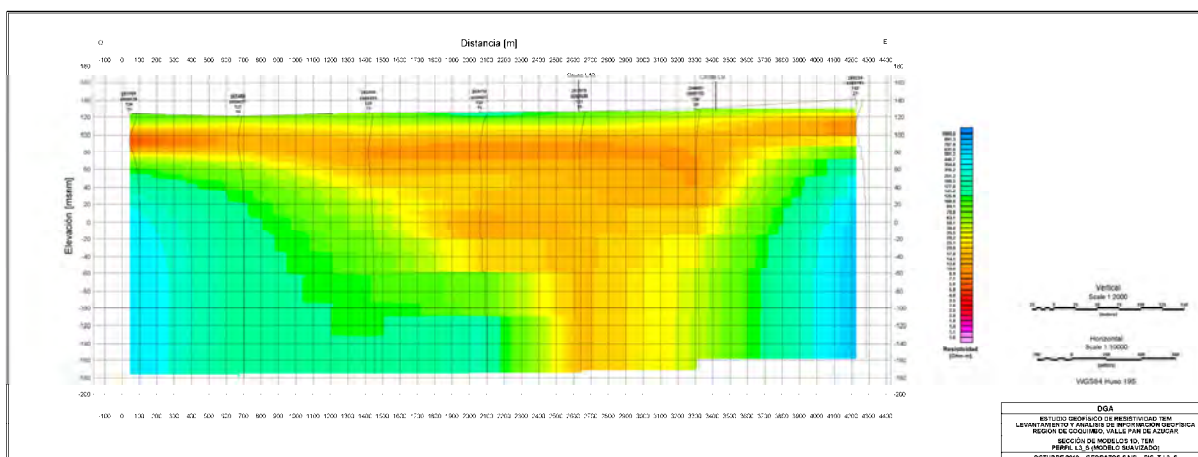


Figura 13. Sección de resistividad TEM, perfil L4 modelo suavizado.

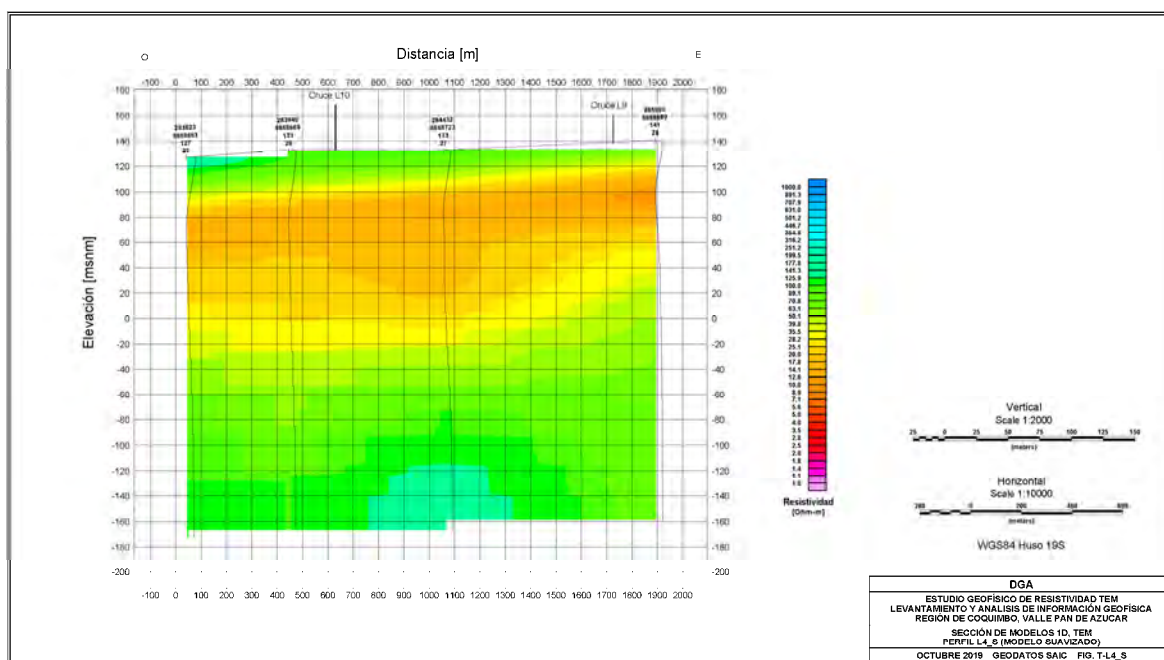


Figura 14. Sección de resistividad TEM, perfil L9 modelo suavizado.

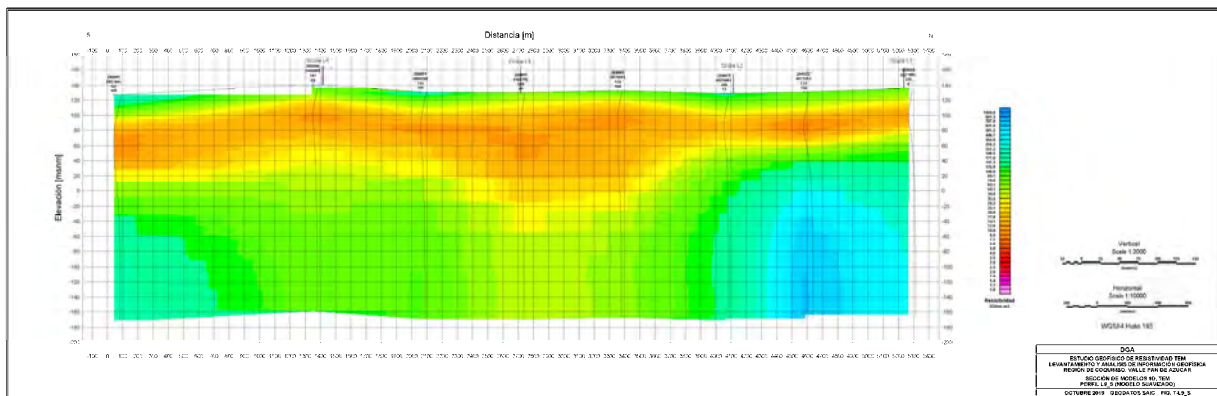
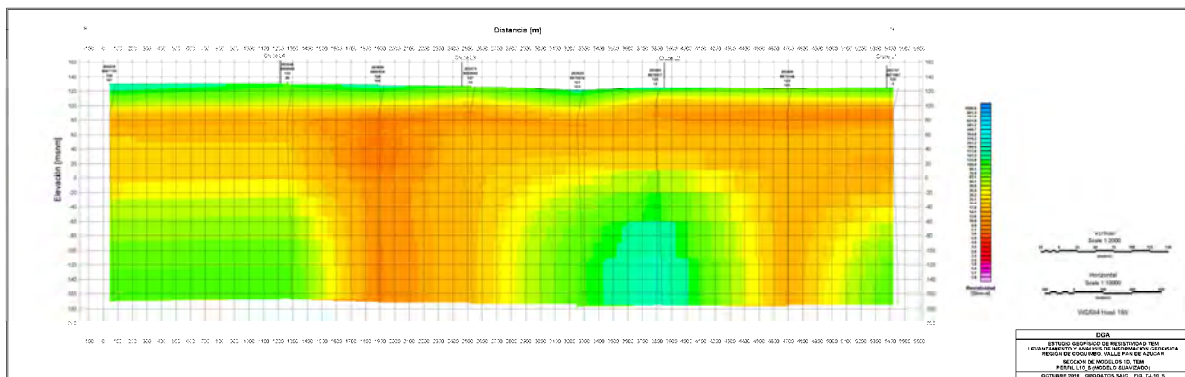


Figura 15. Sección de resistividad TEM, perfil L10 modelo suavizado.



En las secciones de resistividad, los tonos rojos indican valores de baja resistividad (aumento de la conductividad), que se pueden correlacionar normalmente con sedimentos finos arcillosos y/o salobres, mientras que los tonos azules indican un aumento de la resistividad, que se correlacionan con sedimentos superficiales secos y roca basal, mientras que los tonos naranjas, amarillos y verdes dan cuenta de la diversidad de granulometría de los sedimentos como también de la fracturación de la roca del basamento.

Las secciones 1D de resistividad, se han usado como base para correlacionar las unidades geoelectricas (rangos de resistividad) con unidades litológicas (tipos de roca).

5.1.2 Secciones de Interpretación

Sobre las secciones de resistividad se realizó una interpretación geofísica, correlacionando rangos de resistividad con estratos de diferentes características litológicas. En la sección de interpretación que se presentan desde la Figura 16 a la Figura 21 se incluye una leyenda con la descripción de las unidades geoeléctricas consideradas en la interpretación.

Para el área de estudio se definieron las siguientes unidades:

- **Unidad Superficial:** Interpretada como **Sedimentos superficiales no saturados** con resistividades en torno a los 80 Ohm-m pero alcanzando valores en el rango de 50 – 100 Ohm-m. Posee un espesor de 20 – 50 m y tiene una presencia constante en el área estudiado.
- **Unidad Conductora:** Presenta resistividades comprendidas entre 3 y 12 Ohm-m; un espesor variable entre 10-40 m y un espesor anómalo de 100 m bajo la estación 105, se ubica entre la unidad superficial (sedimentos no saturados) y la unidad intermedia (gravas, arenas y limos).
Esta unidad se ha interpretado como **Sedimentos arcillosos**, los cuales son sedimentos finos de baja permeabilidad.
- **Unidad Intermedia:** Se observa a una profundidad entre 40-60 m, con una profundidad anómala de 140 m bajo la estación 105. Tiende a acuñarse hacia el sector Oriental de la zona de estudio y en el sector central es la unidad de mayor potencia alcanzando los 120 m de espesor. Con una resistividad entre 12 – 31 Ohm-m se identifica como **gravas, arenas y limos**. El valor de resistividad para este estrato geoeléctrico varía según el sector y tiene relación con el grado de humedad de los sedimentos prospectados.

Existe una unidad de mayor resistividad que solo se ha identificado en algunas estaciones, con un valor en torno a los 40 Ohm-m corresponde a **Sedimentos compactos**.

- **Unidad asociada a basamento:** Unidad resistiva con valores entorno a los 200 Ohm-m pero alcanzando resistividades en el rango de 136 – 384 Ohm-m. Con profundidades variables entre 70 – 180 m se ha observado en toda la zona

prospectada, salvo ciertas estaciones donde la señal no pudo alcanzar la profundidad donde ésta se encontraba y corresponde a la **roca basal**.

Esta unidad en algunas estaciones se encontró bajo una sección de menores resistividades en el rango de 50 – 100 Ohm m, presente en solo algunas estaciones esta sección se identificó como **roca alterada**.

En los casos donde la señal no alcanzó la roca basal o alterada se hizo un estudio de sensibilidad del modelo ante capas más resistivas en profundidad y se fijó un espesor límite para el último estrato geoelectrico identificado.

Figura 16. Sección de interpretación, perfil L1.

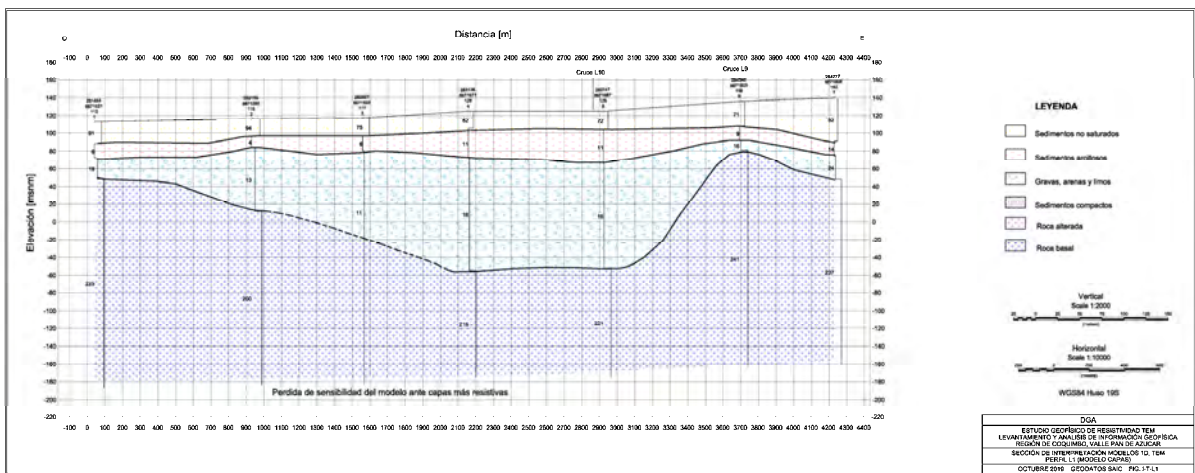


Figura 17. Sección de interpretación, perfil L2.

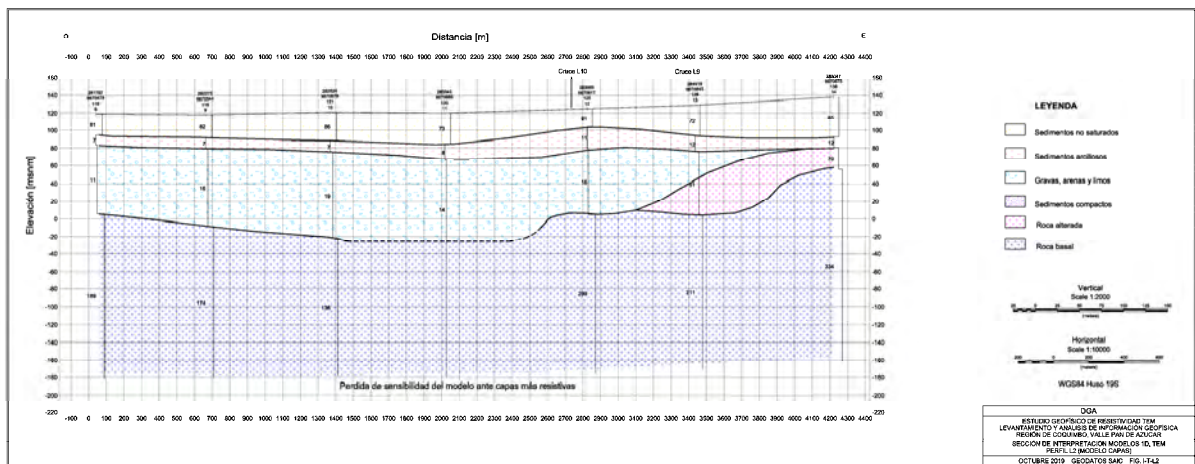


Figura 18. Sección de interpretación, perfil L3.

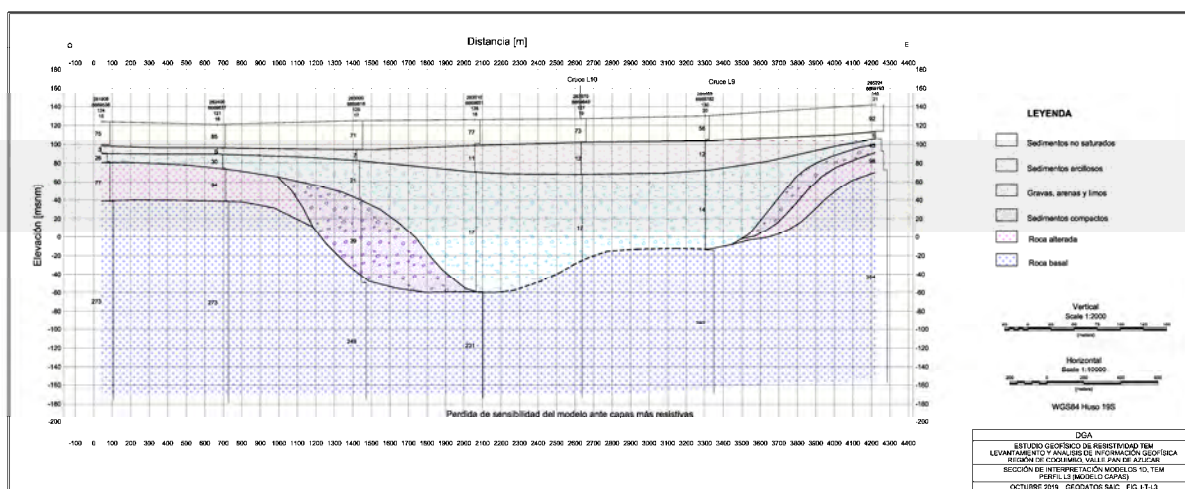


Figura 19. Sección de interpretación perfil L4.

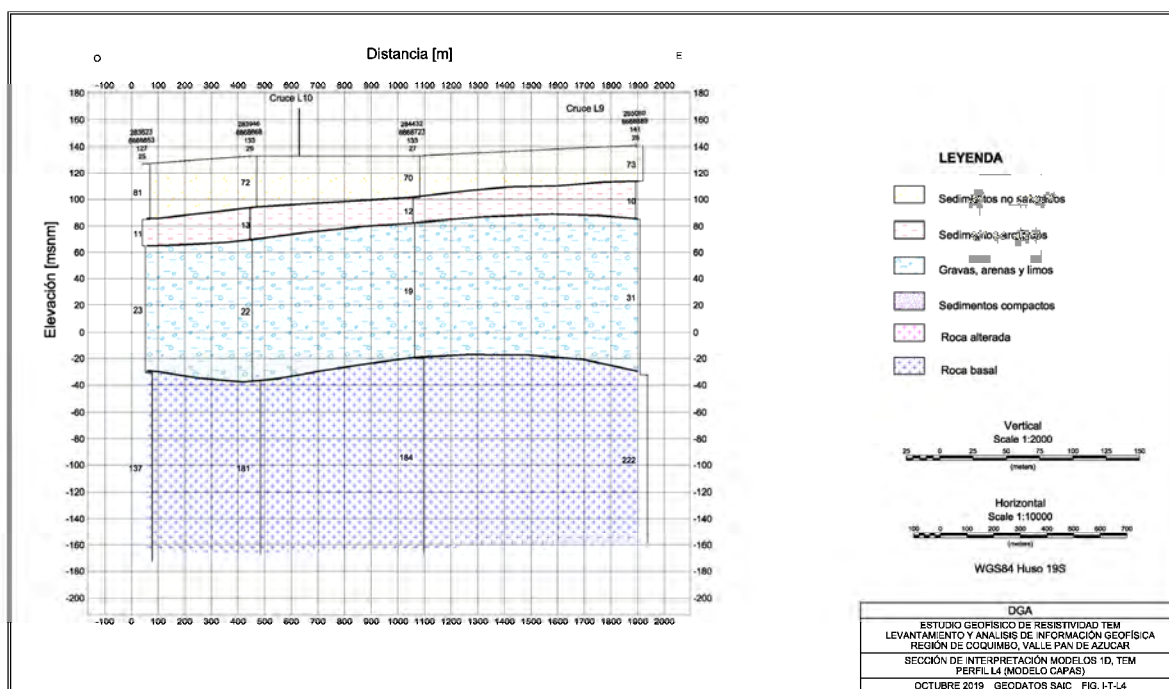


Figura 20. Sección de interpretación, perfil L9.

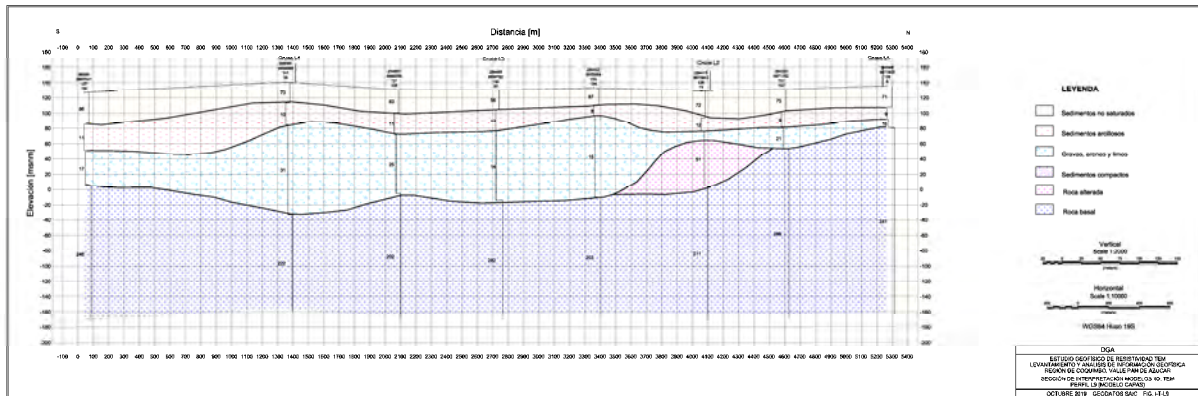
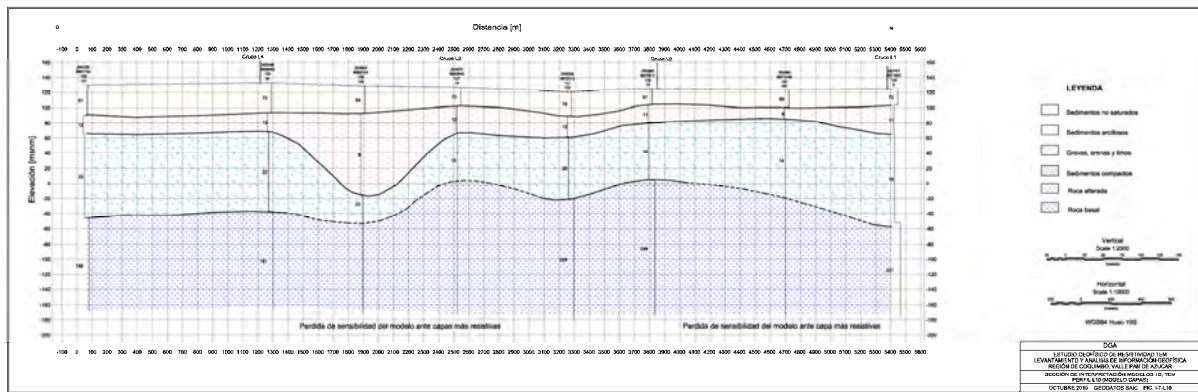


Figura 21. Sección de interpretación, perfil L10.



5.2 RESULTADOS PERFILAJE GEOFÍSICO

La medición con la sonda de densidad entrega un valor esperado para sedimentos en ambos pozos, es decir, en torno a los 2,0 g/cc. Este valor fue considerado para remodelar el perfil gravimétrico extraído de “Estudio Geofísico e Hidrogeológico en la Zona Baja de la Cuenca Del Río Elqui y en la Zona de Pan de Azúcar.

El perfilaje realizado en el pozo “Lo Martínez” indica una disminución de la porosidad entre los 15 y 25 metros de profundidad, acompañado con un aumento de la medición de Gamma natural, lo que es indicativo de una alta presencia de arcillas en este tramo. A partir de los 28 metros de profundidad la porosidad aumenta en forma significativa y la medición de gamma natural mantiene valores mayores que el tramo anterior con una disminución notable de la densidad, lo que muestra que las arcillas observadas disminuyen su presencia y en el sector comienzan a aparecer sedimentos de mayor porosidad como arenas finas. Desde los 45 metros de profundidad y hasta el final del registro la porosidad presenta una mayor alza mientras que el gamma natural se mantiene bajo, por lo que se espera que las arcillas se acompañen de un sedimento de una porosidad mayor que las arenas finas, como lo son las gravas. En el último tramo, comprendido entre los 40 y 73 metros de profundidad, la medición de gamma natural presenta algunas alzas por lo que se espera que la distribución de arcillas no sea homogénea.

El perfilaje realizado en el pozo “Hijuelas Santa Elena” presenta un registro mayor de rayos gamma que el perfilaje realizado en “Lo Martinez” lo que se interpreta como un mayor porcentaje del contenido de arcillas en el suelo de “Hijuelas de Santa Elena”.

La porosidad observada en Hijuelas de Santa Elena es más bien constante por lo que se espera en el sector la presencia de gravas, limos, arenas y arcillas. Entre los 18 y los 23 metros de profundidad se observa un peak en la medición de gamma natural acompañado de un descenso importante en el registro de porosidad, por lo que en este tramo se espera la presencia de un gran contenido de arcillas. Una leve disminución de la porosidad se observa a partir de los 33 metros de profundidad por lo que se establece una mayor presencia de gravas en este tramo.

Los resultados se presentan en las Figuras 22 y 23.

Figura 22. Diagrama Perfilaje Geofísico, Hijuelas Santa Elena.

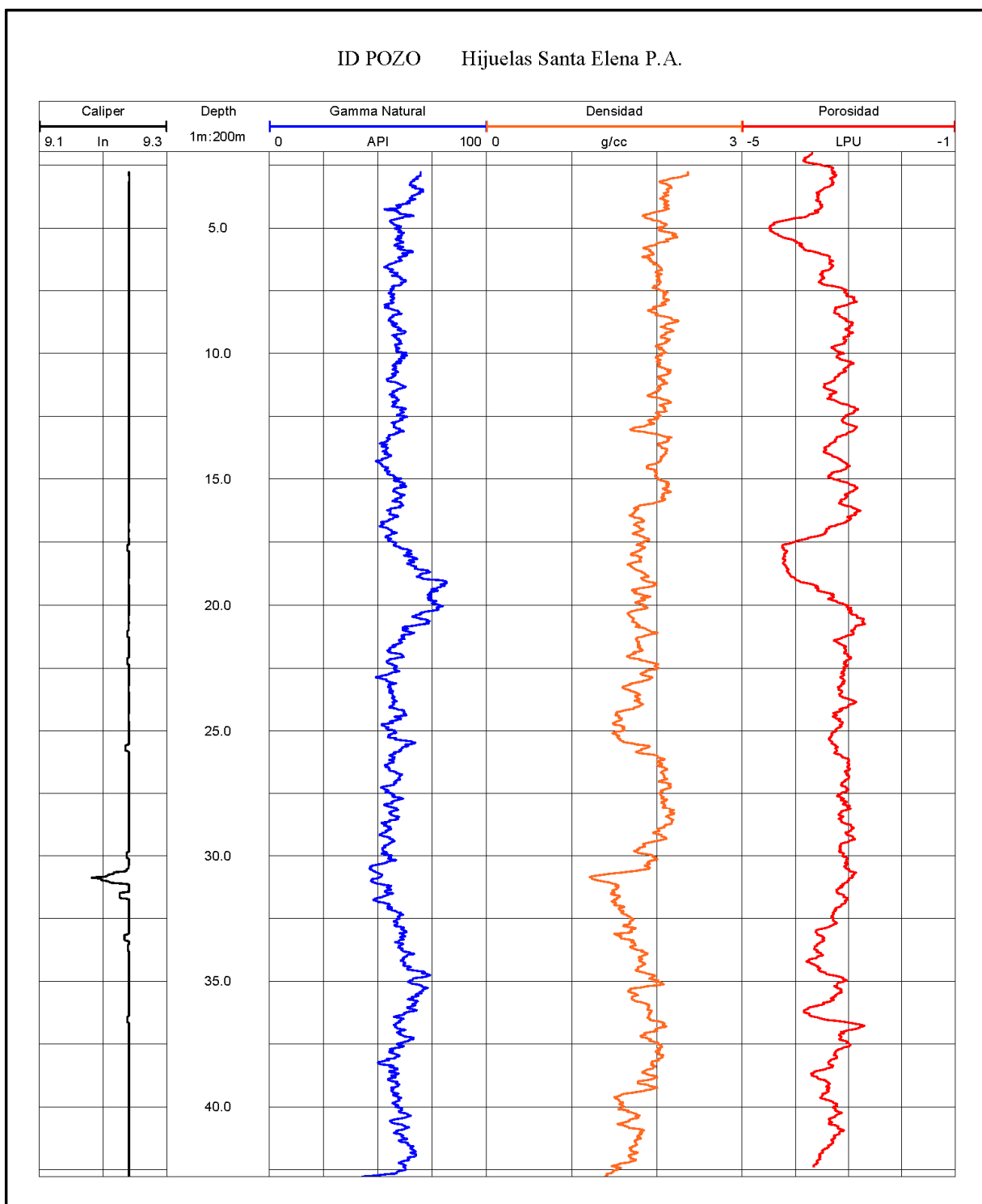
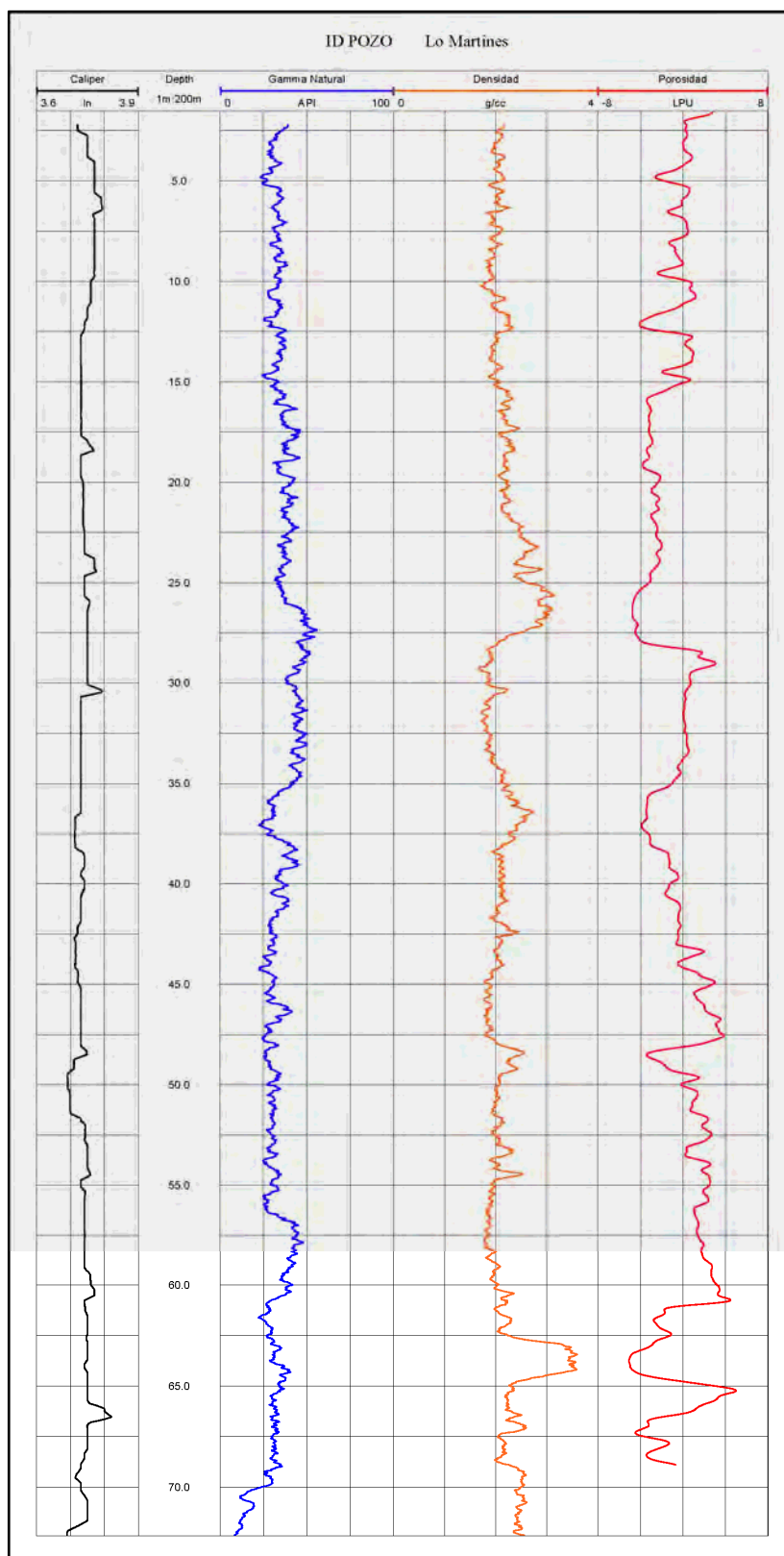


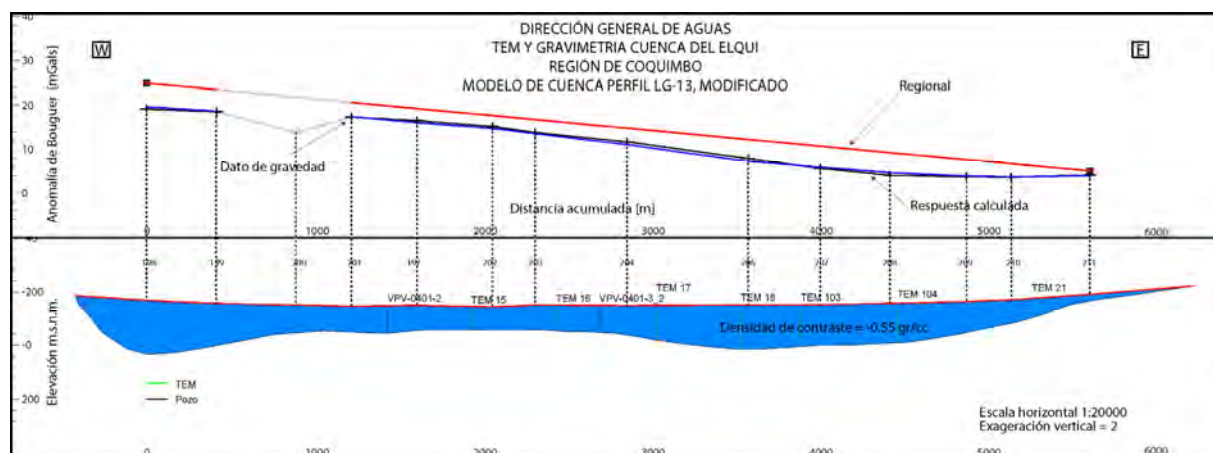
Figura 23. Diagrama Perfilaje Geofísico, Lo Martínez.



6 INTERPRETACIÓN DE ANTECEDENTES

La información obtenida a través de las mediciones TEM y de perfilaje geofísico permitieron reinterpretar el perfil gravimétrico 13 extraído de GCF (2015). Sobre este perfil se midieron las estaciones TEM 103 y 104, en las cuales se modeló la roca de basamento a una profundidad de 140 m, además el perfil gravimétrico 13 se sitúa entre los perfiles de resistividad TEM L2 y L3 por lo que la profundidad de la cuenca debe encontrarse entre las profundidades modeladas por las estaciones TEM que componen estos perfiles. Los pozos contenidos en los expedientes VPC-0401-3 y VPC-0401-2 indican un espesor mínimo para el relleno sedimentario el cual se debe respetar al momento de generar el modelo de cuenca en el perfil 13. Todas estas consideraciones fueron incluidas para reinterpretar este perfil y se señalan en la Figura 24. Para un correcto ajuste entre la gravedad observada y modelada se debe considerar un contraste de densidad de $-0,55 \text{ gr/cc}$ entre sedimentos y roca. lo cual es coincidente con la densidad obtenida por medio de los perfilajes realizados en Hijuelas Santa Elena y Lo Martínez que entregan una densidad de sedimentos en torno a los $2,00 \text{ gr/cc}$.

Figura 24. Perfil Gravimétrico LG 13 modificado de GCF (2015).



Los perfiles de resistividad TEM E-73 y E-20, extraídos de GCF (2015), se sitúan en las cercanías de los perfiles L1 y L4 respectivamente, razón por la cual se considera que los modelos presentados en GCF (2015) son análogos a los perfiles L1 y L4 modelados en este estudio. Las secciones TEM extraídas de GCF (2015) se presentan en las Figuras 25 y 26.

Figura 25. Perfil de Interpretación de Sección de Resistividad TEM E20 extraído de GCF (2015).

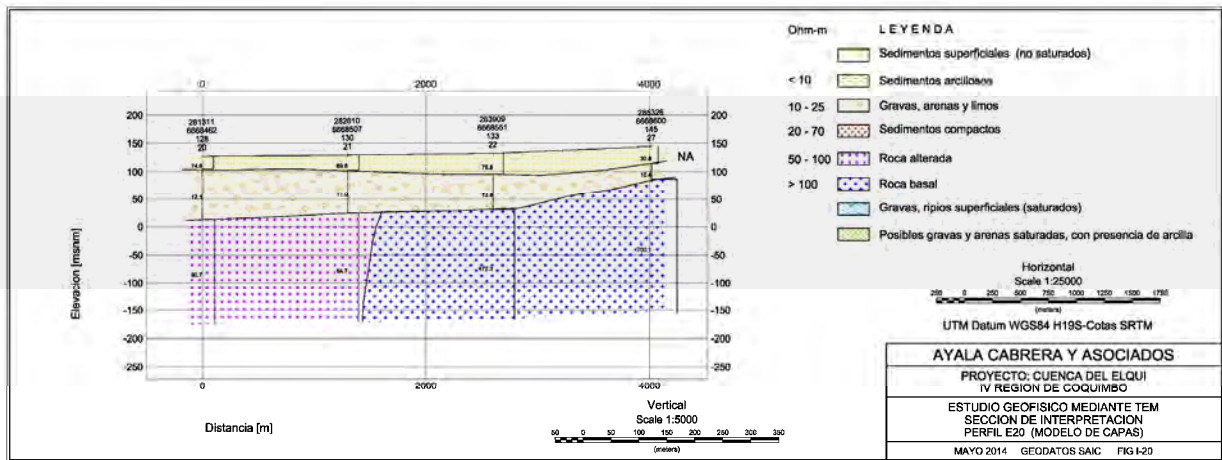
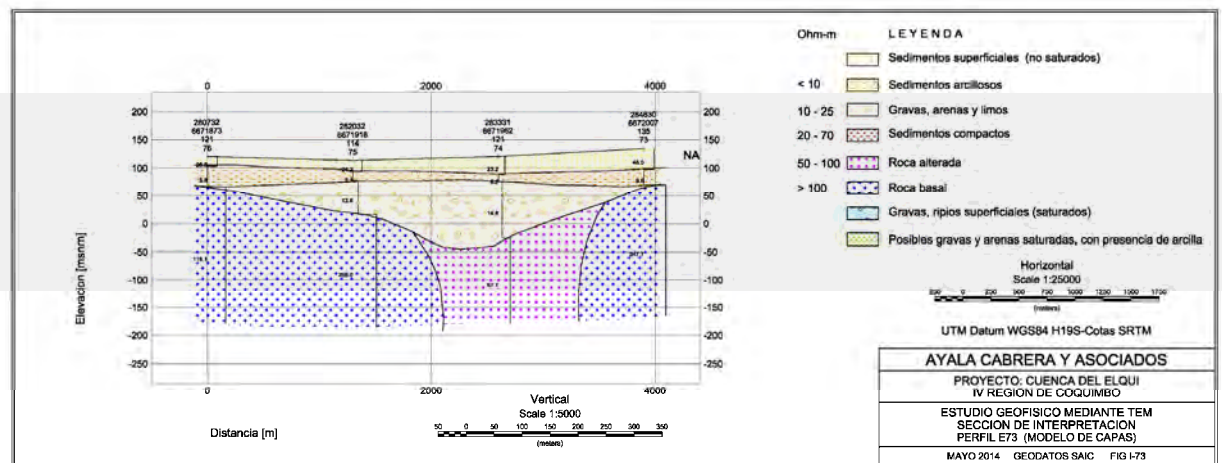


Figura 26. Perfil de Interpretación de Sección de Resistividad TEM E73 extraído de GCF (2015).



Comparando estas secciones se puede observar un aumento importante en la resistividad de la unidad superficial atribuible principalmente a sequedad en los sedimentos prospectados, para las siguientes unidades los valores de resistividad obtenidos son muy similares, así como su potencia.

7 CURSO DE GEOFÍSICA APLICADA A LA HIDROGEOLOGÍA

7.1 Objetivo General

Proveer a los participantes de conocimientos Teóricos y Prácticos en el ámbito de la Geofísica Aplicada a la Hidrogeología con especial énfasis en los Métodos Electromagnéticos, Eléctricos y Gravimétricos.

7.2 Contenidos

Módulo 1:

- a) Adquirir conceptos generales del ámbito de geofísica aplicada a la hidrogeología.
- b) Introducir Teoría y Aplicaciones Métodos Geoeléctricos I (SEV y T.E.)
- c) Introducir Teoría y Aplicaciones Métodos Geoeléctricos II (TEM y SMARTEM).
- d) Introducir Teoría y Aplicaciones Métodos Geoeléctricos III (AMT y MT).

Módulo 2:

- a) Introducir Teoría y Aplicaciones Método Gravimétrico.
- b) Conocer Métodos Geoeléctricos alternativos empleados actualmente para resolver problemáticas hidrogeológicas (OhmMapper, GPR, GEM-2).

Módulo 3:

- a) Adquirir conocimientos generales del procesamiento de método TEM y T.E.
- b) Aprender acerca de la interpretación de resultados TEM y T.E.
- c) Adquirir conocimientos generales para modelación resultados gravimétricos.
- d) Aprender acerca de la interpretación de resultados gravimétricos.

Módulo 4:

- a) Mesa Redonda:
 - Resumir conceptos, revisión de aplicaciones de los métodos geofísicos aprendidos durante la capacitación.
 - Conocer costos asociados a campañas geofísicas.
 - Reforzar criterios importantes para la confección de una adecuada oferta/propuesta técnica.
- b) Evaluar aprendizaje de los participantes al curso de capacitación

- c) Conocer evaluación de los asistentes en relación al desempeño de Geodatos como organismo capacitador.

Generalidades:

- Fechas: 16 a 18 de junio de 2020
- Horarios: 09:00 a 13:15 horas
- Break entre Módulos e Intra-módulos
- Control de Asistencia diarios
- Evaluación conocimiento
- Evaluación desempeño de Geodatos

A continuación, en la Tabla 8, se presenta el Cronograma de las actividades realizadas en el Curso.

Tabla 8. Cronograma de las actividades realizadas en el curso

Módulo	Expositor	Materia	Duración	Horario	Fecha
1	Juan Carlos Parra	Introducción al Curso, Índice de Materias	15 min	9.00 - 9.15	DÍA 1 Martes 16 de Junio
1a	Juan Carlos Parra	Geofísica Aplicada a la Hidrogeología	1 hr	9.15 - 10.150	
Break			15 min	10:15 - 10:30	
1b	Fernando Rodríguez	Métodos Geoelectricos I (SEV y T.E.)	45 min	10.30- 11.15	
Break			15 min	11.15 - 11.30	
1c	Francisca Quiroz	Métodos Geoelectricos II (TEM y SMARTEM)	45 min	11.30 - 12.15	
1d	Juan Carlos Parra	Métodos Geoelectricos III (AMT y MT)	45 min	12.15 - 13.00	
2a	Juan Carlos Parra	Método de Gravimetría (Teoría)	45 min	9.00 - 9.45	DÍA 2 Miércoles 17 de Junio
2b	Fernando Rodríguez	Método de Gravimetría (Casos Reales)	45 min	9.45 - 10.30	
Break			15 min	10.30 - 10.45	
2c	Fernando Rodríguez	Métodos Alternativos (GEM-2, GPR, OHM-MAPPER)	45 min	10.45 - 11.30	
Break			15 min	11.30 - 11.45	
3a	Francisca Quiroz	Procesamiento Datos TEM y T.E.	45 min	11.45 - 12.30	
3b	Fca. Quiroz / Juan C. Parra	Interpretación Datos TEM y T.E.	45 min	12.30 - 13.15	
3c	Fernando Rodríguez	Procesamiento de Datos Gravimetría	45 h	09.00 – 09.45	DÍA 3 Jueves 18 de Junio
3d	Juan C. Parra / Fdo. Rodríguez	Interpretación Datos Gravimétricos	45 min	09.45 - 10.30	
Break			15 min	10.30 - 10.45	
4a	Juan C. Parra /Fca. Quiroz/ Fdo Rodríguez	Mesa Redonda	1 h 30 min	10.45 - 12.15	
4b	Expositores Geodatos	Evaluación Final de Conocimiento	45 min	12.15 - 13.00	
4c	DGA	Evaluación de Asistentes a Geodatos	15 min	13.00 - 13.15	

La Tabla 9 presenta el Listado del personal de la DGA que participó en este curso y el status de Aprobación por Asistencia y Evaluación:

Tabla 9. Listado de participantes del curso y status de aprobación

N°	Nombre				Cargo	Status
1	Gustavo		Abrigo	Cornejo	Analista de Organizaciones de Usuarios	Aprobado
2	Doris	del Carmen	Águila	González	Jefa Unidad Medio Ambiente	Aprobado
3	Shirley	Marlene	Alfaro	Muñoz	Analista de Organizaciones de Usuarios	Aprobado
4	Marcelo	Andrés	Aliaga	Alvarado	Analista Estudios Recursos Hídricos	Aprobado
5	Marcela	Paz	Astudillo	Armijo	Analista de Evaluación y Fiscalización Ambiental	Aprobado
6	Pablo		Avalos	Pino	Analista de Fiscalización	Aprobado
7	Miguel	Esteban	Barahona	Larrere	Analista de Proyectos Obras Mayores	Aprobado
8	Renzzo	Damián	Belmar	Arriagada	Analista de Proyectos Obras Mayores	Aprobado
9	Ángel	Antonio	Berrios	Vergara	Analista de Hidrometría	Aprobado
10	Franco		Buglio	Sánchez	Analista de Red Glaciológica	Aprobado
11	Franco	Andrés	Calderón	Maturana	Analista Resolución de Expedientes	Aprobado
12	Ximena		Carvajal	Quezada	Analista de Fiscalización	Aprobado
13	Gino		Casassa	Rogazinski	Jefe Unidad de Glaciología y Nieves	Aprobado
14	Germán	Adolfo	Daza	Moya	Analista Fiscalización	Aprobado
15	Luis		Díaz	Pacheco	Analista Expedientes	Aprobado
16	Paul		Dourojeanni	Schlotfeld	Analista Estudios Recursos Hídricos	Reprobado
17	Alejandra		Espinoza	Ríos	Analista de Red Glaciológica	Aprobado
18	Carlos		Flores	Arenas	Analista Estudios Recursos Hídricos	Reprobado
19	Pamela		García	Serrano	Jefatura Modelación Recursos Hídricos	Aprobado
20	Diego	Esteban	González	Pavéz	Analista de Red Glaciológica	Aprobado

N°	Nombre				Cargo	Status
21	Harald	Arnoldo	Henzi	Plaza	Analista de Proyectos Obras Mayores	Aprobado
22	Mauricio	Javier	Hernández	Delgado	Analista de Proyectos Obras Mayores	Aprobado
23	Jorge		Huenante	Gutiérrez	Analista de Red Glaciológica	Aprobado
24	Marlene	Lisbet	Huerta	Sandoval	Analista de Fiscalización	Aprobado
25	Marco		Larenas	Contreras	Jefe Subdivisión Proceso y Desarrollo	Aprobado
26	Oscar	Andrés	López	Arenas	Analista Estudios Recursos Hídricos	Aprobado
27	Sebastián		Lucares	Manríquez	Analista Fiscalización	Aprobado
28	Verónica	Mabel	Núñez	Flores	Analista Resolución de Expedientes	Aprobado
29	Maria	Soledad	Orellana	Arpide	Analista de Hidrometría	Aprobado
30	Andrea		Osses	Vargas	Jefatura Gestión de Recursos Hídricos	Aprobado
31	Álvaro	Marcelo	Páez	Torres	Analista de Proyectos Obras Mayores	Aprobado
32	Matías	Javier	Ríos	Acevedo	Analista de Proyectos Obras Mayores	Aprobado
33	Ernesto		Ríos	Ríos	Director Regional	Aprobado
34	Cecilia	del Carmen	Roa	Espinoza	Asistente Administrativa	Aprobado
35	Patricia	Isabel	Rodríguez	González	Analista de Proyectos Obras Mayores	Aprobado
36	Rodrigo	Alejandro	Sáez	Gutiérrez	Analista de Proceso y Desarrollo	Aprobado
37	Nury	Angélica	Salazar	Martínez	Analista Resolución de Expedientes	Aprobado
38	Diego		San Miguel	Cornejo	Jefe Unidad Desarrollo Ambiental	Reprobado
39	Alexis	Andrés	Segovia	Rocha	Analista Glaciología	Aprobado
40	Rodrigo	Andrés	Sepúlveda	González	Analista de Proyectos Obras Mayores	Aprobado
41	Nice	Jeannette	Sepúlveda	Cuevas	Analista de Fiscalización	Aprobado
42	Leonardo		Sosa	Padilla	Analista Expedientes	Aprobado
43	Aracely	Maritza	Ulloa	Sánchez	Sub Agente de Expedientes	Aprobado
44	Fernando	Antonio	Urbina	Fuentes	Analista de Hidrometría	Aprobado
45	Nicolás		Ureta	Parraguez	Jefe Departamento de Organizaciones de Usuarios	Aprobado

N°	Nombre				Cargo	Status
46	Daniel	Ignacio	Valdés	Pizarro	Analista de Proyectos Obras Mayores	Aprobado
47	Roberto	Antonio	Valdés	Serey	Analista de Proyectos Obras Mayores	Aprobado
48	María	Belén	Varela	Mattatal	Analista de Evaluación y Fiscalización Ambiental	Reprobado
49	Luis	Benedicto	Vidal	López	Agente de Expedientes DGA RMS	Aprobado

La no aprobación de la capacitación, de algunos participantes, se debió a que no rindieron la evaluación del curso.

7.3 Actividades

Debido a la contingencia sanitaria provocada por la pandemia del COVID 19 la capacitación se realizó vía telemática, a través de Microsoft Teams.

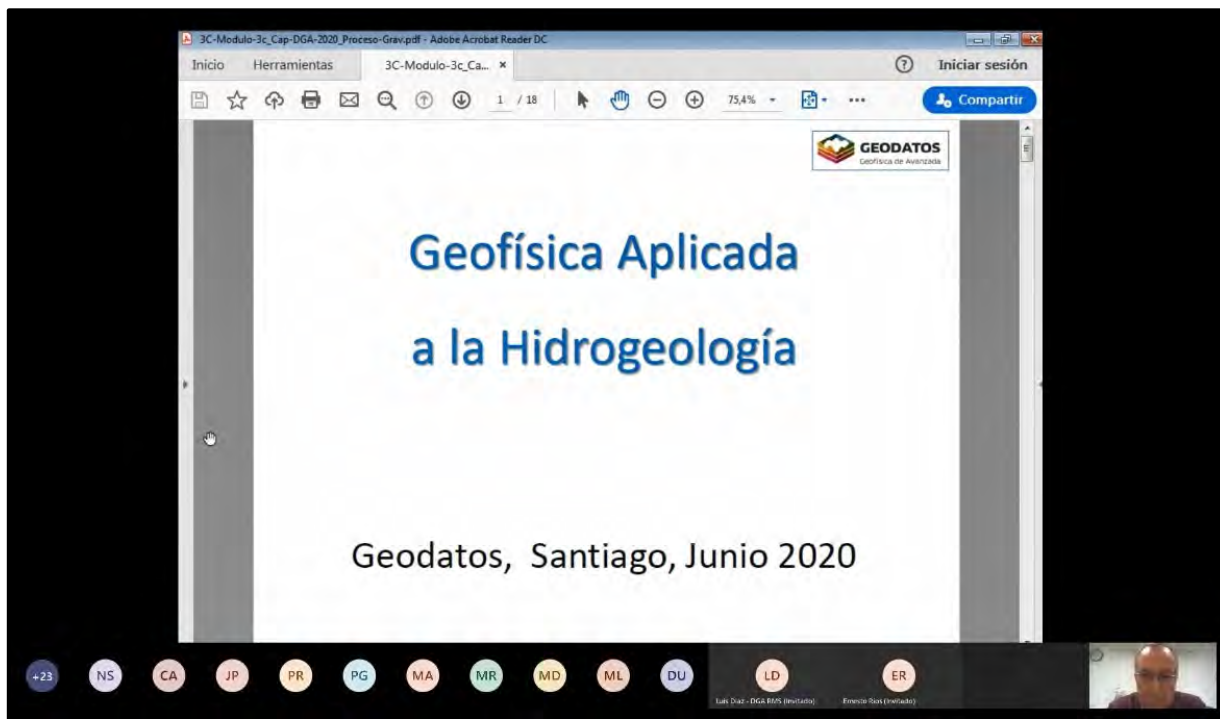
Para el desarrollo de las actividades se envió a los participantes, vía correo electrónico, las presentaciones de los módulos del curso, en formato pdf (Anexo D). Además, el último día se habilitó un enlace web para evaluar los conocimientos adquiridos por los participantes y otro enlace para evaluar el desempeño de Geodatos como organismo capacitador por medio de una encuesta de satisfacción.

A continuación, se presenta una descripción de las actividades realizadas cada día de capacitación y unas imágenes de estas actividades.

Día 1: Oficinas de Geodatos, Santiago, 16 de junio de 2020

Realización del Módulo 1 de la capacitación, con el objetivo de adquirir conceptos generales en el ámbito de la Geofísica aplicada a la Hidrogeología e introducir conceptos teóricos y aplicaciones de los Métodos Eléctricos (SEV y T.E.) y Electromagnéticos (TEM, SMARTEM; AMT y MT).

Figura 27. Primer día de capacitación, donde se realiza el módulo 1 del curso

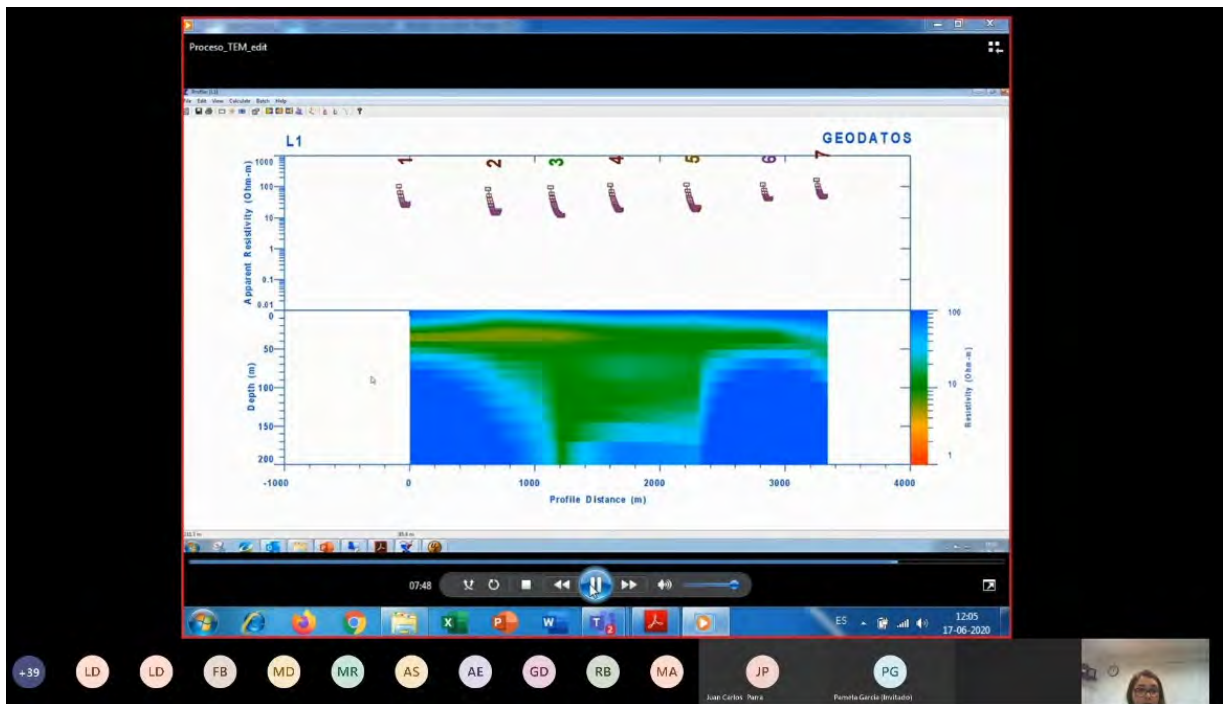


Día 2: Oficinas de Geodatos, Santiago, 17 de junio de 2020

Ejecución del Módulo 2 del curso, donde se realizó una introducción a la teoría y aplicaciones del Método Gravimétrico y se expusieron los Métodos Geoelectricos alternativos empleados para resolver problemáticas hidrogeológicas (OhmMapper, GPR, GEM-2).

Además, se realizaron los Módulos 3a y 3b, donde se explicó el procesamiento de los datos de TEM y Tomografía Eléctrica y la interpretación de los resultados de estos métodos geoelectricos.

Figura 28. Segundo día de capacitación, donde se realizan los módulos 2, 3a y 3b del curso



Día 3: Oficinas de Geodatos, Santiago, 18 de junio de 2020

Realización de los Módulos 3c y 3d con el fin de adquirir conocimientos generales para la modelación de resultados gravimétricos y aprender acerca de la interpretación de estos. Finalmente, se realizó el Módulo 4 el cual consistió en una Mesa Redonda, donde se resumieron los conceptos vistos en la capacitación, se revisaron las aplicaciones de los métodos geofísicos aprendidos, se dio a conocer los costos asociados a campañas geofísicas y se reforzaron los criterios importantes para la confección de una adecuada oferta/propuesta técnica.

Figura 29. Tercer día de capacitación, donde se realizan los módulos 3c, 3d y 4 del curso

Módulo 4

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

Objetivo General:

- ✓ Adquirir conceptos generales del ámbito de geofísica aplicada a la hidrogeología.
- ✓ Introducir teoría y aplicaciones métodos geoelectricos.

Contenido:

□ **Mesa Redonda:**

- Resumen de Conceptos, revisión de Aplicaciones de los métodos geofísicos tratados en Capacitación.
- Criterios Importantes para la Confección de una adecuada solicitud de Estudio Geofísico.
- Costos Asociados a Campañas geofísicas.

2

+39 NS OL RB PR PG MA ER MD ML DU MR LD

Marcos Rivera Luis Diaz - DGA PMS (Realizado)

8 CONCLUSIONES

El trabajo efectuado ha permitido definir diferentes unidades geoelectricas que han sido interpretadas geológicamente en base a criterios netamente geofísicos y han sido satisfactorias para el objetivo planteado inicialmente por la DGA, el cual consistió en definir la geometría del acuífero en el sector de Pan de Azúcar.

Esto se puede observar en la Figura 30, en la cual se han desplegado las secciones de interpretación generadas a partir de los perfiles de resistividad TEM. En todas las secciones se interpretó un sector confinado, constituido por rellenos sedimentarios gruesos, limitado en su parte superior por un estrato de sedimentos arcillosos y en la parte inferior por el basamento sano, ambas unidades consideradas como impermeables.

Las secciones TEM revelan una continuidad del estrato arcilloso en todo el sector de la cuenca estudiada, pero con un espesor variable. Hacia los extremos de los perfiles modelados con dirección O-E esta unidad tiende a acunarse, reduciendo su espesor a 5 – 10 metros mientras que en el sector central alcanza una potencia de hasta 30 metros. También existe una variación en la dirección N-S lo cual se evidencia en el perfil L9, en el sector sur este estrato alcanza 30 metros de espesor y en el sector norte posee un espesor de 10 metros.

La unidad acuífera presenta en los perfiles con dirección O-E forma de cuenca o “cubeta rocosa” como se nombró en GCF (2015). Al igual que el estrato arcilloso se acuña a los extremos y en el sector central alcanza un espesor de hasta 140 metros. En el perfil L3 se reconoció bajo el relleno sedimentario grueso la presencia de sedimentos compactos y roca alterada en las estaciones 15, 16, 17 y 21 (Figura 18), sin embargo, estos estratos sobreyacen el basamento rocoso sano manteniendo así su carácter confinado.

[illegible]

La representación y estimación de flujo de aguas subterráneas no fue realizada por la insuficiente información recolectada del perfilaje geofísico de pozos. Por las características del revestimiento de los pozos perfilados no fue posible utilizar la sonda de resistividad lo que impidió obtener el registro de resistividad esperado. El registro de resistividad generado por este método geofísico entrega mayor resolución en profundidad que las mediciones TEM, lo que permite estimar con mayor fidelidad el volumen del acuífero.

La disminución de la cantidad de pozos perfilados restringió la descripción litológica de pozos al sector Norte y Sur de la zona de estudio por lo que no se pudo generar un mapa de contenido de arcillas y unidades de arena en todo el acuífero, información necesaria para una representación y estimación de flujo de aguas subterráneas.

Las unidades hidrogeológicas identificadas pueden ser caracterizadas según su humedad, al asociarla al valor de resistividad, su potencia y su profundidad. Los datos obtenidos tienen buena correspondencia con la información revisada en GCF (2015), identificando las mismas unidades geoeléctricas en ambos estudios. Considerando que la densidad de datos fue mayor en el estudio presentado en este informe se puede observar con mayor detalle los estratos identificados.

Se asume que la definición del valor de las resistividades y espesores de cada dominio identificado, son representativas de cada unidad, pero pueden fluctuar en aproximadamente un 10 % sin perder validez, dado el error intrínseco del método.

Resulta importante mencionar que se ha elegido un modelo simplificado en cuanto al número de capas de la inversión, procurando un RMS inferior a 5% en el ajuste de la curva a los datos de cada curva de resistividad. Manteniendo el mismo valor de errores, pudo haberse trazado un mayor número de capas, las que para los objetivos del proyecto no aportan más información, sumado al importante contraste de resistividades entre las unidades detectadas, lo que permite que el modelo simplificado de 5 capas sea válido, confiable y satisfactorio.

Se recomienda que, para fines de un análisis detallado de la variación de resistividades en el subsuelo, se revisen los modelos multicapas (smooth), pues presentan fluctuaciones continuas de dicha propiedad geoeléctrica, mientras que, para un análisis discreto del subsuelo, se puede recurrir al modelo de capas, el que es favorable cuando se presenta un claro contraste de resistividades.

9 BIBLIOGRAFÍA

Rozas Elgueta Eduardo 1979; Estudio hidrogeológico Cuenca Pan de Azúcar: Provincia de Elqui, IV Región Chile; Universidad Técnica del Estado La Serena; Instituto de Investigaciones.

Dirección General de Aguas (DGA) 1998; Control y Evaluación de Recursos Hídricos Subterráneos IV Región. Volumen 1: Estudio y Modelo Hidrogeológico Valle Pan de Azúcar; Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación, AC – Ingenieros Consultores Ltda; Series SIT; No. 50.

Dirección General de Aguas (DGA) 2004; Aplicación del Modelo Hidrogeológico Valle Pan de Azúcar; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación. Series SDT; No. 176.

Dirección General de Aguas (DGA) 2015; Estudio Geofísico e Hidrogeológico en la Zona Baja de la Cuenca del Río Elqui y en la Zona de Pan de Azúcar. GCF Ingenieros.