



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIRECCIÓN REGIONAL METROPOLITANA DE
SANTIAGO

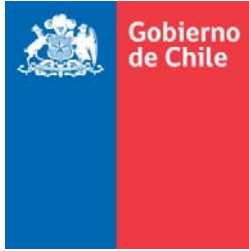
**ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA MODELACIÓN
HIDROGEOLÓGICA DE LOS SUB SECTORES
ACUÍFEROS DE LA CUENCA DEL ESTERO YALI,
COMPLEMENTARIO AL DIAGNÓSTICO PLAN
MAESTRO DE RECURSOS HÍDRICOS, REGIÓN
METROPOLITANA DE SANTIAGO.**

INFORME FINAL

**REALIZADO POR:
GEODATOS SAIC**

S.I.T. N° 375

Santiago, Diciembre 2015



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIRECCIÓN REGIONAL METROPOLITANA DE
SANTIAGO**

**Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña**

**Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia**

**Inspector Fiscal
Ingeniero Geógrafo Sr. Pablo Liendo Latorre**

GEODATOS SAIC

**Jefe Proyecto
Geofísico Sénior Sr. Juan Carlos Parra E.**

INDICE DE MATERIAS

1	Introducción.....	9
2	Trabajo de Terreno.....	12
2.1	Logística.....	12
2.2	Instrumental Gravimétrico.....	12
2.3	Instrumental Tem.....	14
2.4	Mediciones Gravimétricas.....	14
2.5	Mediciones Tem.....	15
2.6	Mediciones GPSD de Vértices Loops Tem.....	16
3	Proceso de Datos Tem y NanoTEM.....	17
3.1	El método de Transiente Electromagnético.....	17
3.2	Inversión 1D.....	17
3.3	Secciones de Resistividad NanoTEM.....	18
3.4	Secciones de Resistividad Tem.....	19
4	Proceso de Datos Gravimétricos.....	19
4.1	Correcciones Estándares.....	19
4.2	Corrección Topográfica.....	20
4.3	Modelamiento 2D.....	20
4.4	Medición de Densidad de Muestras de Terreno.....	21
5	Conclusiones.....	23
5.1	Sondeos Tem y NanoTEM.....	23
5.1.1	Secciones de Interpretación NanoTEM.....	23
5.1.2	Secciones de Interpretación Tem.....	25
5.2	Perfiles Gravimétricos.....	26
6	Resumen.....	28
7	BIBLIOGRAFIA.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de Ubicación del Área de Estudio
Figura 2	Mapa de Líneas Geofísicas sobre Imagen <i>GoogleEarth</i> , esc 1:50,000
Figura 3	Mapa de Estaciones y Líneas Geofísicas sobre Topografía SRTM
Figura 4	Mapa de Estaciones y Líneas Geofísicas

Modelamiento Gravimétrico 2D del Basamento tipo Cuenca:

Figura G1	Modelo Gravimétrico Línea L1
Figura G2	Modelo Gravimétrico Línea L2
Figura G3	Modelo Gravimétrico Línea L3
Figura G4	Modelo Gravimétrico Línea L4
Figura G5	Modelo Gravimétrico Línea L5
Figura G6	Modelo Gravimétrico Línea L6
Figura G7	Modelo Gravimétrico Línea L7
Figura G8	Modelo Gravimétrico Línea L8
Figura G9	Modelo Gravimétrico Línea L9
Figura G10	Modelo Gravimétrico Línea L10
Figura G11	Modelo Gravimétrico Línea L11
Figura G12	Modelo Gravimétrico Línea L12
Figura G13	Modelo Gravimétrico Línea L13
Figura G14	Modelo Gravimétrico Línea L14

Secciones Resistividad NanoTEM:

Figura NT-L1	Sección Resistividad NanoTEM Línea L1, modelo de capas
Figura NT-L1-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L1, modelo suavizado
Figura NT-L2	Sección Resistividad NanoTEM Línea L2, modelo de capas
Figura NT-L2-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L2, modelo suavizado
Figura NT-L6	Sección Resistividad NanoTEM Línea L6, modelo de capas
Figura NT-L6-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L6, modelo suavizado
Figura NT-L7	Sección Resistividad NanoTEM Línea L7, modelo de capas
Figura NT-L7-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L7, modelo suavizado
Figura NT-L8	Sección Resistividad NanoTEM Línea L8, modelo de capas
Figura NT-L8-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L8, modelo suavizado
Figura NT-L9	Sección Resistividad NanoTEM Línea L9, modelo de capas
Figura NT-L9-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L9, modelo suavizado
Figura NT-L10	Sección Resistividad NanoTEM Línea L10, modelo de capas
Figura NT-L10-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L10, modelo suavizado
Figura NT-L11	Sección Resistividad NanoTEM Línea L11, modelo de capas
Figura NT-L11-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L11, modelo suavizado
Figura NT-L12	Sección Resistividad NanoTEM Línea L12, modelo de capas
Figura NT-L12-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L12, modelo suavizado
Figura NT-L13	Sección Resistividad NanoTEM Línea L13, modelo de capas
Figura NT-L13-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L13, modelo suavizado
Figura NT-L100	Sección Resistividad NanoTEM Línea L100, modelo de capas
Figura NT-L100-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L100, modelo suavizado
Figura NT-L101	Sección Resistividad NanoTEM Línea L101, modelo de capas
Figura NT-L101-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L101, modelo suavizado
Figura NT-L102	Sección Resistividad NanoTEM Línea L102, modelo de capas
Figura NT-L102-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L102, modelo suavizado
Figura NT-L103	Sección Resistividad NanoTEM Línea L103, modelo de capas
Figura NT-L103-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L103, modelo suavizado
Figura NT-L104	Sección Resistividad NanoTEM Línea L104, modelo de capas
Figura NT-L104-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L104, modelo suavizado
Figura NT-L105	Sección Resistividad NanoTEM Línea L105, modelo de capas
Figura NT-L105-S	Sección Resistividad NanoTEM Línea L105, modelo suavizado

Secciones Resistividad TEM:

Figura T-L1	Sección Resistividad TEM Línea L1, modelo de capas
Figura T-L1-S	Sección Resistividad TEM Línea L1, modelo suavizado
Figura T-L2	Sección Resistividad TEM Línea L2, modelo de capas
Figura T-L2-S	Sección Resistividad TEM Línea L2, modelo suavizado
Figura T-L6	Sección Resistividad TEM Línea L6, modelo de capas
Figura T-L6-S	Sección Resistividad TEM Línea L6, modelo suavizado
Figura T-L7	Sección Resistividad TEM Línea L7, modelo de capas
Figura T-L7-S	Sección Resistividad TEM Línea L7, modelo suavizado
Figura T-L8	Sección Resistividad TEM Línea L8, modelo de capas
Figura T-L8-S	Sección Resistividad TEM Línea L8, modelo suavizado
Figura T-L9	Sección Resistividad TEM Línea L9, modelo de capas
Figura T-L9-S	Sección Resistividad TEM Línea L9, modelo suavizado
Figura T-L10	Sección Resistividad TEM Línea L10, modelo de capas
Figura T-L10-S	Sección Resistividad TEM Línea L10, modelo suavizado
Figura T-L11	Sección Resistividad TEM Línea L11, modelo de capas
Figura T-L11-S	Sección Resistividad TEM Línea L11, modelo suavizado
Figura T-L12	Sección Resistividad TEM Línea L12, modelo de capas
Figura T-L12-S	Sección Resistividad TEM Línea L12, modelo suavizado
Figura T-L13	Sección Resistividad TEM Línea L13, modelo de capas
Figura T-L13-S	Sección Resistividad TEM Línea L13, modelo suavizado
Figura T-L100	Sección Resistividad TEM Línea L100, modelo de capas
Figura T-L100-S	Sección Resistividad TEM Línea L100, modelo suavizado
Figura T-L101	Sección Resistividad TEM Línea L101, modelo de capas
Figura T-L101-S	Sección Resistividad TEM Línea L101, modelo suavizado
Figura T-L102	Sección Resistividad TEM Línea L102, modelo de capas
Figura T-L102-S	Sección Resistividad TEM Línea L102, modelo suavizado
Figura T-L103	Sección Resistividad TEM Línea L103, modelo de capas
Figura T-L103-S	Sección Resistividad TEM Línea L103, modelo suavizado
Figura T-L104	Sección Resistividad TEM Línea L104, modelo de capas
Figura T-L104-S	Sección Resistividad TEM Línea L104, modelo suavizado
Figura T-L105	Sección Resistividad TEM Línea L105, modelo de capas
Figura T-L105-S	Sección Resistividad TEM Línea L105, modelo suavizado

Secciones Interpretación NanoTEM:

Figura I-NT-L1	Sección Interpretación NanoTEM Línea L1
Figura I-NT-L2	Sección Interpretación NanoTEM Línea L2
Figura I-NT-L6	Sección Interpretación NanoTEM Línea L6
Figura I-NT-L7	Sección Interpretación NanoTEM Línea L7
Figura I-NT-L8	Sección Interpretación NanoTEM Línea L8
Figura I-NT-L9	Sección Interpretación NanoTEM Línea L9
Figura I-NT-L10	Sección Interpretación NanoTEM Línea L10
Figura I-NT-L11	Sección Interpretación NanoTEM Línea L11
Figura I-NT-L12	Sección Interpretación NanoTEM Línea L12
Figura I-NT-L13	Sección Interpretación NanoTEM Línea L13
Figura I-NT-L100	Sección Interpretación NanoTEM Línea L100
Figura I-NT-L101	Sección Interpretación NanoTEM Línea L101
Figura I-NT-L102	Sección Interpretación NanoTEM Línea L102
Figura I-NT-L103	Sección Interpretación NanoTEM Línea L103
Figura I-NT-L104	Sección Interpretación NanoTEM Línea L104
Figura I-NT-L105	Sección Interpretación NanoTEM Línea L105

Secciones Interpretación TEM:

Figura I-T-L1	Sección Interpretación TEM Línea L1
Figura I-T-L2	Sección Interpretación TEM Línea L2
Figura I-T-L6	Sección Interpretación TEM Línea L6
Figura I-T-L7	Sección Interpretación TEM Línea L7
Figura I-T-L8	Sección Interpretación TEM Línea L8
Figura I-T-L9	Sección Interpretación TEM Línea L9
Figura I-T-L10	Sección Interpretación TEM Línea L10
Figura I-T-L11	Sección Interpretación TEM Línea L11
Figura I-T-L12	Sección Interpretación TEM Línea L12
Figura I-T-L13	Sección Interpretación TEM Línea L13
Figura I-T-L100	Sección Interpretación TEM Línea L100
Figura I-T-L101	Sección Interpretación TEM Línea L101
Figura I-T-L102	Sección Interpretación TEM Línea L102
Figura I-T-L103	Sección Interpretación TEM Línea L103
Figura I-T-L104	Sección Interpretación TEM Línea L104
Figura I-T-L105	Sección Interpretación TEM Línea L105

Tabla 1. Parámetros de Mediciones TEM

Tabla 2. Parámetros de Mediciones NanoTEM

Tabla 3. Densidad de Muestras de Afloramientos de Roca Basal

Anexo A Coordenadas Estaciones TEM-NanoTEM

Anexo B Coordenadas Estaciones Gravimétricas y Profundidad del Basamento

Anexo NT1 Curvas medidas NanoTEM

Anexo NT2 Inversiones y Modelos 1D Resistividad NanoTEM

Anexo T1 Curvas medidas TEM

Anexo T2 Inversiones y Modelos 1D Resistividad TEM

Anexo T3 Coordenadas de Vértices de *Loops* TEM

1 INTRODUCCION

A solicitud de la **DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA)**, Geodatos realizó un Estudio Geofísico de Gravimetría y Transiente Electromagnético (TEMy NanoTEM) en el Proyecto denominado **“Estudio Geofísico para la Modelación Hidrogeológica de los Subsectores Acuíferos de la Cuenca del Estero Yali, Complementario al Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos, Región Metropolitana de Santiago”**, Sector Melipilla, Región Metropolitana, Chile (Figura 1).

El estudio está orientado al levantamiento de información geofísica para la modelación hidrogeológica de los acuíferos de los subsectores de la cuenca del Estero Yali (Figura 2), lo que contribuirá a generar información que permita tomar decisiones y llevar a cabo medidas de gestión para un mejor aprovechamiento, uso y sustentabilidad del recurso hídrico existente. Estos subsectores son: Yali Alto, San Vicente, Yali Medio, Las Diucas, Maitenlahue y San Pedro.

Gravimetría

El objetivo del estudio Gravimétrico es determinar, mediante modelamientos 2D tipo cuenca, la profundidad al basamento en el relleno sedimentario que conforman las cuencas mencionadas. Las líneas gravimétricas parten y terminan en afloramientos del basamento. Todas las estaciones se geo-referenciaron mediante GPS diferencial, Datum WGS-84, 19S.

De acuerdo con lo solicitado, complementariamente a las mediciones gravimétricas se extrajeron muestras de roca en los afloramientos de los extremos de las líneas, para medir sus densidades en Laboratorio. Estos valores podrán ser usados para determinar con mayor precisión el contraste de densidad en el proceso de modelamiento gravimétrico, además de incrementar las bases de datos de parámetros de carácter hidrogeológico del sector de estudio.

Transiente Electromagnético

El objetivo de los sondeos de Transiente Electromagnético es determinar, mediante modelamientos 1D e integración de modelos en secciones, la estratigrafía geoelectrica profunda (TEM) y somera (NanoTEM) y suministrar (TEM) estimaciones de la profundidad del basamento que sirvan como puntos de control en el modelamiento gravimétrico.

Según lo requerido, suplementariamente a las mediciones electromagnéticas, se georeferenciaron con GPS Diferencial los vértices de los *Loops* utilizados en el levantamiento de TEM, con el propósito de acrecentar la base de datos de elevación del terreno para la construcción de un modelo digital de la superficie del suelo, usado en la modelación numérica de los sistema hídricos.

Antecedentes

Los siguientes párrafos se refieren a aspectos técnicos del presente proyecto, algunos abordados en la Reunión de Inicio (Licitación 1114-16-LE15, Acta del 24 de Septiembre del 2015) y otros resultantes del reconocimiento inicial de Terreno y del desarrollo de la Campaña de Terreno.

DGA proporcionó a Geodatos los documentos digitales "*Objetivos del Estudio y Perfiles Propuestos de Gravimetría*" y en formato PDF el Informe: "***Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos, Cuenca del Estero Yali, Noviembre 2000***", realizado por APR Ingeniería S.A. – AC Ingenieros Consultores Ltda. Este reporte incorpora información de diferentes fuentes, como, entre otras, Meteorología, Cartografía, Geología, Geofísica (Transiente Electromagnético, pag. 4-1 a 4-14), Pozos, Sondajes, Hidrología y Modelación Hidrogeológica.

Se contó con la asistencia de personal de la DGA en la elaboración de un catastro de los fundos y propietarios del área de estudio y en la obtención de los permisos de ingreso y medición al interior de sus propiedades. Además, el Sr. Pablo Liendo, Inspector Fiscal del Proyecto, concurrió dos veces a terreno para supervisar el procedimiento de gestión de permisos y la operación de adquisición de datos geofísicos.

La planificación inicial propuesta por DGA consistía de una serie de perfiles longitudinales y transversales conteniendo estaciones de medida para cada método geofísico (Grav, TEM y NanoTEM), geo-referenciando cada estación geofísica mediante GPS Diferencial. En total se consideraba medir al menos 70 estaciones, con una distancia entre puntos no superior a 350 m, cada una con lecturas de Gravimetría, TEM y NanoTEM, y usando Loop de 200 m para el TEM y 50 m para el NanoTEM.

Debido a que los perfiles gravimétricos deben entregar las variaciones del contacto relleno-basamento con el mejor detalle posible, Geodatos propuso disminuir la distancia entre estaciones en los perfiles más cortos, lo que significaría un aumento de aproximadamente un 30 a 40% del número de estaciones gravimétricas, sin cargo a DGA. También se acordó medir TEM con Loops de 100 m, debido a la característica agrícola y rural del lugar, donde en general no hay espacios despejados muy grandes.

La inspección del terreno mostró que, por una parte, no sería posible medir TEM-NanoTEM en varios lugares debido a plantaciones, construcciones, generadores de ruido electromagnético (líneas de potencia, instalaciones industriales, maquinaria, etc.), falta de espacio para el despliegue de cables requerido en los métodos electromagnéticos. El tamaño acordado de Loop de 100 m de lado del TEM debió incluso ser reducido a 50 m en lugares de espacio reducido.

Por otra parte, durante la campaña de terreno, no se contó con permiso de ingreso de varios propietarios a lugares apropiados. Esto significó no sólo una pérdida de tiempo, sino que también del número de mediciones GPSD de los vértices del Loop de varias estaciones TEM, pues se concedió permiso la primera vez para medir TEM-NanoTEM, pero no la segunda vez para medir GPSD.

Sin embargo, tomando en cuenta la magnitud y relevancia del proyecto, se realizó un gran esfuerzo por medir en lugares que fueran significativos para los propósitos del estudio. Esto implicó asignar más recursos logísticos y contar con la presencia de varios Operadores de Terreno en diferentes períodos, consiguiéndose finalmente medir lo siguiente:

- **70 estaciones TEM-NanoTEM**, cumpliendo el mínimo solicitado.
- **155 estaciones Gravimétricas**, más del doble de lo requerido.

2 TRABAJO DE TERRENO

2.1 Logística

Los datos Gravimétricos, Topográficos y Electromagnéticos fueron medidos por operadores especializados, con asistentes calificados, movilizados en vehículos 4x4 doble cabina con sistemas de localización GPS y equipo de apoyo general.

2.2 Instrumental Gravimétrico

El instrumental usado para las mediciones gravimétricas y topográficas es el siguiente:

- Gravímetro Scintrex CG-5 Digital Automatizado.
- GPS Doble Frecuencia CHC X9000 RTK, estación base y un móvil.
Error Horizontal: 10 milímetros ± 1 ppm, Vertical: 20 milímetros ± 1 ppm,
Iniciación 10 segundos.
- GPS de navegación en tiempo real Garmin 45 (error ~ 30 m).

Gravímetro Scintrex modelo CG-5

Este gravímetro, del tipo "*microgravity meter*", tiene una resolución geodésica de 0.001mgals. Está basado en un microprocesador que tiene un rango de operación de 8000 mgal sin necesidad de inicializar. Las mediciones gravimétricas son corregidas automáticamente por mareas y errores de nivelación. Posee memoria sólida y los datos son exportados a un computador.

Especificaciones Técnicas Gravímetro Scintrex CG-5:

- Tipo de sensor: Cuarzo fundido con NULO electrostático
- Resolución de lectura: 1 microgals (0.001mgals)
- Desviación Standard: menor que 10 microgal
- Rango de Operación: 8,000mgal sin reseteo

- Deriva residual estática: menos que 0.02mgal por día
- Rango de Compensación por nivelación automática: +/- 200 arcseg.
- Correcciones automáticas: Marea, Nivelación, Temperatura, Ruidos
- Memoria: 48k RAM, hasta 1200 lecturas.
- Temperaturas de Operación: -40°C a +45°C
- Salida digital: RS- 232 serial.

Sistema de posicionamiento de GPS diferencial

En este caso se usó un sistema de posicionamiento de GPS diferencial de doble frecuencia marca HUACE NAV modelo X-900. El sistema de posicionamiento GPS diferencial consta de dos instrumentos GPS, uno instalado en una estación base y otro que recorre las líneas de medición.

Los instrumentos tienen una razón de actualización cada 1 segundo. La antena corresponde a una de alta sensibilidad. Para el cálculo de la posición X, Y y H se usan 72 canales, manteniendo la constelación óptima de satélites disponibles.

El posicionamiento final de los datos se obtiene mediante un post-proceso que considera los datos de la línea y de la estación base, los cuales están sincronizados.

Especificaciones Técnicas Instrumental GPS Diferencial:

- Número de Canales: 72 canales paralelos
- Precisiones:
- Cinemático en tiempo real.
 - Horizontal $\pm (10 \text{ mm} + 1\text{ppm})\text{RMS}$
 - Vertical $\pm (20 \text{ mm} + 1\text{ppm})\text{RMS}$
 - Tiempo iniciación 10 seg.
- Formato: HCN, DAT, RINEX
- Memoria Interna: 64 Mb. 8 horas de medición continua
- Inicialización: Libreta electrónica HUSKY FS/2
- Resolución de lectura: centimétrico modo diferencial
- Temperaturas de Operación: -30°C a +65°C
- Salida digital: RS- 232, USB, Bluetooth

2.3 Instrumental TEM

El equipo usado para la adquisición de datos TEM corresponde a un sistema marca *Zonge, USA*, compuesto de los siguientes instrumentos:

- Receptor digital multipropósito modelo GDP-32
- Transmisor TEM modelo ZT-30. Fuente de energía: batería.
- Transmisor NanoTEM modelo NT-20. Fuente de energía: batería.

El receptor digital multipropósito GDP-32 funciona para 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 la frecuencia), CSAMT, AMT, etc.

El instrumento receptor posee filtros digitales controlados por software. Los datos son almacenados en memoria de estado sólido y transferidos electrónicamente a una computadora portátil.

2.4 Mediciones Gravimétricas

La gravedad terrestre se midió en 155 puntos distribuidos en 14 perfiles.

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran las estaciones y líneas geofísicas, en representaciones con Imagen Satelital Google y Topografía SRTM del Terreno. El Anexo B contiene las coordenadas GPS Diferencial de las estaciones gravimétricas, Datum WGS-84 19S.

Se establecieron dos bases gravimétricas en terreno, ubicadas en lugares estables de fácil acceso y libre de ruido cultural, para 'amarrar' diariamente las estaciones medidas.

El posicionamiento de las estaciones gravimétricas se realizó mediante GPS Diferencial en modo RTK, con una precisión de ± 1 cm en la vertical y ± 10 cm en la horizontal y han sido referenciadas desde el vértice geodésico del IGM VILLA ALHUE (ALUE), Datum SIRGAS,

elipsoide GRS-80, Huso 19 Sur. Las coordenadas de cada estación gravimétrica se detallan en el Anexo B1.

Cada estación gravimétrica fue registrada usando un método de "loop" ligado a una estación base que es registrada al inicio y al final del "loop", distribuyendo el error de cierre proporcionalmente al intervalo de tiempo entre lecturas. Las lecturas gravimétricas fueron medidas de acuerdo con el siguiente procedimiento:

1. Instalación y nivelación del gravímetro en cada estación al menos un minuto antes de tomar la medida con el fin de permitir su estabilización.
2. Cada medición gravimétrica es repetida al menos una vez. En caso de exceder la precisión del equipo por causa de ruido cultural, se repite la medida las veces que sea necesario para obtener un buen promedio.
3. En caso de estaciones planificadas ubicadas en lugares de topografía inaccesible, el operador procede a re-localizarla en el lugar accesible más cercano.

2.5 Mediciones TEM

Se midió un total de 70 estaciones con sondeos TEM y NanoTEM, distribuidos en las cercanías de los perfiles gravimétricos, las que fueron localizadas y replanteadas en terreno de acuerdo a la disponibilidad de acceso y espacio para la instalación del *loop*. La estación 9 sólo se midió con TEM.

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran las estaciones y líneas geofísicas, en representaciones con Imagen Satelital Google y Topografía SRTM del Terreno. El Anexo A contiene las coordenadas GPS Diferencial de las estaciones, Datum WGS-84 19S.

Las Tablas 1 y 2 indican los parámetros usados para las lecturas TEM y NanoTEM, respectivamente. El tamaño del *loop* dependió del área de terreno para desplegar los cables.

Tabla 1. Parámetros de Mediciones TEM

Parámetro	Valor
Frecuencias de Medición	1, 2, 4, 8, 16 y 32 Hz
Configuración de Espiras	<i>Loop</i> Coincidente
Dimensiones <i>Loop</i> Transmisor	100x100 o 50x50 m ²
Dimensiones <i>Loop</i> Receptor	100x100 o 50x50 m ²

Tabla 2. Parámetros de Mediciones NanoTEM

Parámetro	Valor
Frecuencias de Medición	32 y 64 Hz
Configuración de Espiras	<i>Loop</i> Central
Dimensiones <i>Loop</i> Transmisor	50x50 m ²
Dimensiones <i>Loop</i> Receptor	10x10 m ²

2.6 Mediciones GPSD de Vértices de Loops de TEM

El [Anexo T3](#) presenta un listado con las coordenadas UTM y cotas de los vértices y centro de las estaciones TEM. Por denegación de permiso de entrada a ciertos predios, no se permitió entrar una segunda vez a registrar con GPSD lo que se había medido con TEM-NanoTEM una autorizada primera vez. Por ello, no todas las estaciones TEM están con sus vértices medidos con GPS. En ciertas estaciones se pudo medir sólo algunos vértices. En tres estaciones TEM se usó la medición GPSD de la Gravimetría. La columna final del Listado describe si el punto es vértice o centro del Loop de TEM, y si se consideró la medición GPSD de la Grav.

3 PROCESO DE DATOS TEM y NanoTEM

3.1 El Método de Transiente Electromagnético

El TEM es un método electromagnético inductivo en el dominio del tiempo. Mediante espiras metálicas instaladas en el suelo se generan corrientes de conducción en el subsuelo y se mide el campo magnético transiente producido por el decaimiento de estas corrientes al detener la transmisión. Este proceso se repite usando corrientes del tipo "positiva-nula-negativa-nula", con frecuencias (de 'repetición') que usualmente varían entre 1 y 32 Hz, con paso binario, en el TEM normal.

La corriente inducida se distribuye por difusión y su comportamiento depende de la resistividad, tamaño y forma de las estructuras geoelectricas. El análisis numérico de la curva transiente del campo magnético permite inferir información cuantitativa acerca de los parámetros geoelectricos del subsuelo.

Al ser el TEM una técnica inductiva, 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 caliche), característico en ciertos lugares del norte chileno.

En el modo de NanoTEM se usan las frecuencias de 32 y 64 Hz mediante circuitos electrónicos de muy alta velocidad que permiten muestrear las curvas transientes con mayor detalle. Con esto se logra una mejor resolución de la estructura geoelectrica más somera (correspondiente a tiempos menores o más cercanos). Se disminuyen también las dimensiones de las espiras transmisora y receptora en torno al punto de sondeo.

3.2 Inversión 1D

La inversión de la curva de resistividad aparente de un sondeo de transiente electromagnético permite obtener las resistividades y espesores de un modelo estratificado del subsuelo (modelo 1D) bajo la estación.

En el presente caso se usó el sistema **IX1D de Interpex**, con el cual se obtienen en forma semi-automática dos tipos de modelos: uno suavizado (*smooth*), compuesto de un gran número de estratos delgados y variación gradual de la resistividad, y otro “de capas” (*layered*), formado por un número representativo de estratos y variación discontinua de la resistividad. A partir del modelo de capas el programa calcula un conjunto de modelos equivalentes, que representan gráficamente las variaciones posibles de cada parámetro para el mismo ajuste del modelo final.

Los Anexos NT1 y T1 presentan las curvas medidas en terreno de NanoTEM y TEM, respectivamente. Se observa un nivel apreciable de ruido electromagnético “cultural” en tiempos tardíos del NanoTEM y aún de mayor magnitud en las curvas TEM. Los datos de alto ruido en cada curva fueron eliminados antes de ingresar al sistema de inversión. En conjunto, los datos de NanoTEM son de mejor calidad que los datos TEM.

Los Anexos NT2 y T2 muestran las inversiones y modelos 1D de los sondeos NanoTEM y TEM, respectivamente. Cada figura consta de dos ventanas: en la izquierda se encuentran los datos observados y la curva teórica final de la inversión. Los puntos datos marcados con “x” se consideran ruidosos y fueron desactivados durante el proceso de inversión. En la ventana derecha se muestra la resistividad en función de la profundidad, con el modelo de capas en línea continua roja, el modelo suavizado en línea continua verde y los modelos equivalentes en líneas a trazos.

3.3 Secciones de Resistividad NanoTEM

A partir de los modelos de capas y modelos suavizados de las inversiones 1D, se construyeron secciones de resistividad NanoTEM para cada uno de los 16 perfiles formados con sondeos relativamente alineados.

Las Figuras NT-L1, NT-L2, NT-L6 a NT-L13 y NT-L100 a NT-L105 muestran las secciones de los modelos de capas, con una exageración vertical de 10 para facilitar la visualización del comportamiento de la resistividad a lo largo de las líneas. La escala de colores de la resistividad es única y va de 1 a 1000 Ωm .

De manera similar, las Figuras NT-L1-S, NT-L2-S, NT-L6-S a NT-L13-S y NT-L100-S a NT-L105-S muestran las secciones de los modelos suavizados.

3.4 Secciones de Resistividad TEM

A partir de los modelos de capas y modelos suavizados de las inversiones 1D, se construyeron secciones de resistividad TEM de las mismas 16 líneas de NanoTEM.

Las Figuras T-L1, T-L2, T-L6 a T-L13 y T-L100 a T-L105 muestran las secciones de los modelos de capas, con una exageración vertical de 2 para facilitar la visualización del comportamiento de la resistividad a lo largo de las líneas. La escala de colores de la resistividad es única y va de 1 a 1000 Ωm .

De manera similar, las Figuras T-L1-S, T-L2-S, T-L6-S a T-L13-S y T-L100-S a T-L105-S muestran las secciones de los modelos suavizados.

4 PROCESO DE DATOS GRAVIMÉTRICOS

4.1 Correcciones Estándares

El gravímetro Scintrex CG-5 corrige automáticamente la deriva instrumental y el efecto de marea. Sin embargo, para mayor confiabilidad, se realizaron cierres diarios sobre un punto de referencia, compensando las lecturas en función del tiempo, y se recalculó el efecto de marea durante el proceso de datos. Se aplicaron las siguientes correcciones estándares para obtener la Anomalía de Bouguer (Δg), realizadas mediante el sistema de proceso y análisis de datos geofísicos Oasis Montaj de Geosoft, Canadá.

$$\Delta g = G_{obs} + \Delta_{atmos} - G_{teo} - \Delta_{boug} + \Delta_{a_libre} + \Delta_{topo}$$

donde:

- G_{obs} : gravedad observada
- Δ_{atmos} : corrección atmosférica = $0.87 \exp(-0.116 h^{1.047})$
h: altura sobre el nivel del mar
- G_{teo} : gravedad teórica (WGS84) = $G_0 (1+C_1 \sin^2 \alpha)/(1-C_2 \sin^2 \alpha)^{1/2}$
 $G_0 = 978032.67714$
 $C_1 = 0.00193185138639$
 $C_2 = 0.00669437999013$
 $\alpha =$ latitud
- Δ_{boug} : corrección de Bouguer = $2\pi G \rho h$
 G : constante de gravitación universal = 0.00667
(Densidades en [gr/cc] y alturas en [m])
 ρ : densidad media de la corteza (2.6 gr/cc).
- Δ_{a_libre} : corrección de aire libre = 0.3086 h
- Δ_{topo} : corrección topográfica (ver párrafo siguiente)

4.2 Corrección Topográfica

La corrección topográfica de cada estación se calculó de acuerdo al procedimiento contenido en el software Oasis Montaj, usando el modelo topográfico digital público **SRTM** (*Shuttle Radar Topography Mission*), de 90 m de resolución horizontal.

4.3 Modelamiento 2D

La interfaz sedimentos/basamento se determinó con el modelamiento de las líneas gravimétricas mediante el sistema Model_Vision_Pro de Encom, Australia, considerando un modelo 2D de cuenca formado por dos unidades de densidades homogéneas, que representan los depósitos sedimentarios y la roca basal.

Las Figuras G-1 a la G-14 presentan los modelos de cuenca de las líneas gravimétricas medidas. Cada figura consta de dos paneles: el superior muestra los datos gravimétricos, el regional local y la curva sintética; el inferior es una sección del relieve interpretado del basamento, o modelo de cuenca del perfil.

Se incluye en cada gráfico información seleccionada de los sondeos TEM invertidos que muestran un substrato resistivo asociable al basamento.

Considerando que el área de estudio (de aproximadamente 15 Km x 15 Km) está definido sobre un mismo sistema de sub cuencas interconectadas (Cuenca del Estero Yali), se usó un contraste de densidad único de -0.6 gr/cc. Este contraste de densidad debe considerarse como la diferencia entre una densidad promedio representativa de los sedimentos y una densidad promedio representativa del basamento, aun cuando cada medio puede poseer variaciones locales que no son cuantificables.

Cabe hacer notar que los datos de densidad obtenidos en Laboratorio de las muestras de afloramientos de roca basal en los extremos de los perfiles gravimétricos, sólo dan cuenta de la densidad del substrato del modelo gravimétrico de Cuenca. No se tienen mediciones del estrato superior que representa los sedimentos.

Dada la diversidad de sedimentos que conforman las cuencas, principalmente con variaciones en profundidad, la medición de muestras superficiales de los sedimentos no es representativa de esta diversidad. Por ello, se consideró promedios generales de cada medio, con una diferencia representativa de -0.6 gr/cc, que resulta apropiada para los modelos gravimétricos con inclusión de la información TEM.

4.4 Medición de Densidad de Muestras de Terreno

Se extrajeron varias muestras de afloramientos de roca basal en los extremos de los perfiles gravimétricos. El sistema para medir la densidad consta de una balanza y un matraz, ambas de alta precisión. Con ellos se miden el peso y el volumen (agua desplazada por la muestra), cuya razón da directamente la densidad.

La Tabla 3 muestra las densidades obtenidas, con identificación de la estación y línea gravimétrica.

Tabla 3. Densidad de Muestras de Afloramientos de Roca Basal

Línea	Estación	Densidad Promedio (gr/cc ³)
1	1	2.3
2	92	2.18
3	14	2.01
3	23	2.72
4	31	2.01
4	24	2.56
5	37	2.69
5	32	2.37
5	88	2.47
6	38	2.47
6	42	2.73
7	55	2.43
7	43	2.26
8	56	2.16
8	78	2.49
9	67	2.72
10	159	2.34
10	78	2.6
11	76	2.22
11	74	2.46
12	82	2.73
12	77	2.36
13	86	2.49
13	83	2.42

5 CONCLUSIONES

5.1 Sondeos TEM y NanoTEM

El objetivo general del estudio TEM-NanoTEM es la determinación cuantitativa de la resistividad eléctrica del subsuelo en la zona de interés, constituido por formaciones sedimentarias y rocas impermeables del basamento. Estas propiedades geoelectricas dependen de la mineralogía (litología) y microestructura (porosidad, granulometría, fracturación) de las rocas, las cuales pueden variar significativamente según la profundidad.

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 Interpretación NanoTEM

Los resultados NanoTEM describen una estratigrafía más somera que la del TEM (con una profundidad de investigación de alrededor de 60 m, una quinta parte de la del TEM), pero con mayor resolución. En este caso, en general el NanoTEM muestra variaciones de resistividad donde el TEM presenta el estrato superior.

Las Figuras I-NT-L1, I-NT-L2, I-NT-L6 a I-NT-L13 y I-NT-L100 a I-NT-L105 muestran la interpretación realizada de los sondeos NanoTEM. En éstas, es posible distinguir de modo general cinco unidades geoelectricas principales, cuya definición se ve facilitada por el claro contraste de resistividades laterales y en profundidad que se aprecia en los perfiles.

- a) **Unidad Resistiva Superficial:** Este horizonte superficial presenta un espesor aproximadamente constante, no obstante, en algunos tramos de los perfiles NT-L2, NT-L7, NT-L103 y NT-L105 no se observa esta unidad. Se caracteriza por potencias de 3 a 24 metros de espesor y con resistividades eléctricas comprendidas entre los 68 a 1419 [Ohm-m]. Esta unidad se ha asociado a **Depósitos sedimentarios cuaternarios secos**, compuestos por los diferentes horizontes edáficos en desarrollo y por sedimentos de diferentes granulometrías no saturados.

- b) Unidad Conductora:** Esta unidad se encuentra en algunos casos subyaciendo a la unidad resistiva superficial y en otros casos se encuentra interdigitada con las siguientes unidades sedimentarias a describir. Se encuentra formando un horizonte no continuo, con cambios laterales hacia otras unidades, en muchos casos con acuñamientos laterales. Las resistividades son del orden de los 3.2 a 10.6 [Ohm-m], interpretándose como **Sedimentos Finos (arcillas y limos) húmedos y/o saturados.**
- c) Unidad de Media Conductividad:** Esta unidad se encuentra en todos los perfiles de la misma manera que la unidad anterior, interdigitada con las unidades sedimentarias. Muestra una mayor continuidad lateral, sin embargo también presenta numerosos acuñamientos laterales y gradaciones hacia las demás unidades. Se caracteriza por valores de resistividad de 11 a 25 [Ohm-m]. Esta unidad ha sido interpretada como **Sedimentos gruesos (arenas-gravas) húmedos y/o saturados.**
- d) Unidad de Media Resistividad:** Este dominio se encuentra prácticamente en todos los perfiles, en clara unión con las dos unidades anteriormente descritas. Muestra poca continuidad lateral a lo largo de los perfiles que se presenta, acuñándose lateralmente o gradando hacia las anteriores unidades. Se caracteriza por valores de resistividad de 27 a 50 [Ohm-m], siendo interpretada como **Sedimentos muy gruesos (gravas y bloques).** Esta unidad pudiera estar saturada en algunas zonas donde sea mayor la proporción de gravas.
- e) Unidad Resistiva:** Esta unidad conforma la unidad subyacente al resto de dominios descritos. Presenta gran continuidad lateral, salvo en algunos segmentos donde desaparece debido a la mayor potencia de las demás unidades. En general presenta valores de resistividad eléctrica que fluctúan entre los 67.8 – 6403 [Ohm-m]. Esta unidad constituiría la **Roca Basal** de la cuenca, conformada en su mayoría por batolitos ígneos de diferente naturaleza. Los valores menores de resistividad serían indicativos de dominios de alteración mientras que los valores mayores harían referencia a roca sana y competente.

5.1.2 Secciones de Interpretación TEM

En el presente trabajo, los sondeos TEM tienen el objetivo de determinar la estratigrafía geoelectrica de resistividad del subsuelo, con una profundidad de investigación de aproximadamente 300 m, y obtener estimaciones de la profundidad del basamento que puedan usarse para apoyar el modelamiento gravimétrico. Los resultados de los 14 perfiles TEM medidos muestran una estratigrafía de cuatro capas, con un conductor intermedio que se puede interpretar como el estrato acuífero. El estrato subyacente resistivo correspondería al basamento impermeable.

Las Figuras I-T-L1, I-T-L2, I-T-L6 a I-T-L13 y I-T-L100 a I-T-L105 muestran la interpretación realizada de los sondeos TEM, considerando los resultados Gravimétricos y una geología regional para estimar la posición de cada punto dentro de las unidades geológicas básicas (basamento, sedimento).

Uno de los aspectos tomados en cuenta en la interpretación de los resultados TEM es la remoción de estratos delgados profundos que aparecen en algunos de los extremos de las secciones de resistividad TEM de los modelos de capas. Estos conductores corresponden a "artefactos" de la modelación que surgen cuando la roca basal es somera (menor que el tamaño del Loop usado en la medición), lo que genera una rápida difusión de las corrientes (medio resistivo) y una preponderancia del ruido de fondo. En principio, las curvas debieran acortarse a tiempos menores, pero se prefiere mantenerlas como una posibilidad e incluirlas o no en la interpretación de acuerdo a la información complementaria. También se consideran los resultados de las secciones de los modelos suavizados, donde el efecto de estos artefactos es mucho menor.

En los perfiles TEM es posible distinguir de modo general cuatro unidades geoelectricas principales, cuya definición se ve facilitada por el claro contraste de resistividades laterales y en profundidad que se aprecia en los perfiles.

- a) **Unidad Resistiva Superficial:** Este horizonte superficial presenta una morfología prácticamente plano paralela a la superficie, con cambios de espesor consecuentes con las variaciones de la topografía. Se caracteriza por espesores de 34 a 116 metros y valores de resistividad de 76.8 a 1958 [Ohm-m]. Esta unidad se ha interpretado

como **Depósitos sedimentarios cuaternarios secos**, compuestos por las diferentes granulometrías secas de los aluviales y coluviales cercanos.

- b) Unidad Conductora:** Esta unidad se encuentra en algunos casos subyaciendo a la unidad resistiva superficial y en otros casos se encuentra interdigitada con la unidad subsiguiente. Se encuentra formando un horizonte no continuo, con cambios laterales gradacionales hacia otra unidad y en muchos casos con acuñamientos laterales. Las resistividades son del orden de los 1.6 a 10.7 [Ohm-m], interpretándose como **Sedimentos Finos (arcillas y limos) húmedos y/o saturados**.
- c) Unidad de Media Conductividad:** Esta unidad se encuentra en todos los perfiles, presentando cambios laterales por gradación hacia la unidad conductora e incluso acuñamientos. Se caracteriza por valores de resistividad de 12 a 32 [Ohm-m]. Esta unidad ha sido interpretada como **Sedimentos gruesos (arenas-gravas) húmedos y/o saturados**.
- d) Unidad Resistiva:** Esta unidad conforma la unidad base de todas las secciones descritas. Presenta gran continuidad lateral, con valores de resistividad eléctrica que fluctúan entre los 67.8 – 6403 [Ohm-m]. Esta unidad constituiría la **Roca Basal** de la cuenca, conformada en su mayoría por batolitos ígneos de diferente naturaleza. Los valores menores de resistividad serían indicativos de dominios de alteración mientras que los valores mayores harían referencia a roca sana y competente.

5.2 Perfiles Gravimétricos

Los modelamientos gravimétricos se realizaron con un sistema de inversión 2D y asumiendo un modelo de dos estratos (sedimentos/basamento) y un contraste de densidad de -0.6 gr/cc. Como puntos de control de la profundidad del basamento se consideraron las dos siguientes condiciones:

1. Dado que los perfiles se 'apoyan' en afloramientos de roca basal, esto implica que la profundidad del basamento en los extremos de los perfiles es muy somera (pocos metros).
2. Información de profundidad del basamento de sondeos TEM seleccionados, donde la profundidad del substrato resistivo de los TEM es compatible con los requerimientos de la Gravimetría. Así, se dejaron fuera aquellos modelos TEM localizados en los extremos de los perfiles y que muestran una delgada capa conductora profunda (estimados como 'artefactos' de la inversión), así como los TEM situados relativamente cerca de instalaciones de tipo industrial, líneas de potencia, objetos metálicos, etc., generadores de ruido electromagnético.

Las Figuras G1 a G14 muestran la interpretación de las líneas gravimétricas, dada por la interfaz entre el estrato superior y el estrato inferior, cada uno de densidad uniforme. En algunos de estos perfiles se incluyen los TEM considerados en el ajuste de la interfaz durante el modelamiento gravimétrico 2D. Los gráficos del relieve del basamento (ventana inferior) tienen una exageración vertical de 2.

La profundidad máxima del basamento varía aproximadamente entre 20 y 150 m, denotando a priori una geometría muy variable a lo largo de los perfiles, con una clara interacción con posibles estructuras tectónicas que podrían estar creando subsidencia en algunos sectores preferentemente.

Cabe destacar los perfiles G.6, G.7 y G.8, de mayor longitud, en los que se puede apreciar claramente la ondulación del basamento. Los modelos gravimétricos conforman más de una subcuenca en cada uno de los perfiles mencionados, siendo más notorio en el perfil G.7 donde el extremo Oeste del perfil identifica una elevación del basamento, formando una subdivisión en la deposición y acomodación de los sedimentos. Este tipo de conformación de subcuencas estaría en este caso íntimamente ligado a fallas en el basamento ígneo que, debido a su desplazamiento, promoverían mayor subsidencia en las zonas ligadas a ella.

6 RESUMEN

A requerimiento de la **Dirección General de Aguas (DGA)**, se realizó un estudio geofísico mediante Gravimetría y Transiente Electromagnético (TEM y NanoTEM), como parte del proyecto denominado ***“Estudio Geofísico para la modelación hidrogeológica de los subsectores acuíferos de la cuenca del Estero Yalí, complementario al diagnóstico plan maestro de recursos hídricos, Región Metropolitana de Santiago”***, Sector Melipilla, Región Metropolitana.

Los resultados principales del estudio geofísico mediante las modalidades TEM y NanoTEM son la caracterización de los depósitos que conforman el relleno sedimentario, con lo cual se determina propiedades hidrogeológicas relacionadas con la permeabilidad de las formaciones. Mediante la gravimetría se determinó la forma y profundidad de la cuenca hasta el basamento en los sectores estudiados.

Se ejecutaron 14 perfiles mediante el método gravimétrico, la modelación de cada uno de estos perfiles se realizó con un sistema de inversión 2D y asumiendo un modelo de dos estratos (sedimentos/basamento) y un contraste de densidad de -0.6 [gr/cc]. Como puntos de control de la profundidad del basamento se hicieron coincidir los extremos de cada perfil con afloramientos de roca basal, además se utilizó información de profundidad al basamento detectados por los sondeos TEM. Las profundidades al basamento observadas por el método gravimétrico fluctúan aproximadamente entre 20 y 190 metros, denotando a priori una geometría muy variable a lo largo de los perfiles, evidenciándose una clara interacción con posibles estructuras tectónicas que podrían estar creando subsidencia en algunos sectores preferentemente.

Además de las mediciones gravimétricas efectuadas para cubrir la cuenca, el estudio consideró la medición de 70 estaciones TEM y 69 estaciones NanoTEM, distribuidas en 16 perfiles (para cada una de las modalidades). Los resultados principales del estudio geofísico de Transiente Electromagnético (en ambas modalidades) corresponden a la caracterización de los depósitos que conforman el relleno sedimentario hasta una profundidad de investigación de aproximadamente 300 metros para la modalidad TEM y 60 metros para NanoTEM (el cual tiene mayor resolución en estratos más someros, en donde el TEM sólo detectó una unidad), con lo cual se determina propiedades hidrogeológicas relacionadas con la permeabilidad de las formaciones.

7 BIBLIOGRAFIA

- 1 Ingeniería S.A. – AC Ingenieros Consultores Ltda, "*Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos, Cuenca del Estero Yali, Noviembre 2000*", p 10