



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA**

**METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN MURO DE  
TRANQUES DE RELAVES BASADO EN LA TÉCNICA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN GEOFÍSICA**

**LEOPOLDO ANDRÉS CÓRDOVA PAVEZ**

**PROFESORA GUÍA:  
DIANA COMTE SELMAN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
DANIEL DÍAZ ALVARADO  
MARÍA JIMENA VARGAS OTTE**

**SANTIAGO DE CHILE  
2024**

# RESUMEN

La causa más frecuente de falla en los tranques de relaves está relacionada con la acción de la filtración y fuga de agua a través del muro de contención aguas abajo, lo que resulta en inestabilidad y falla. Una de las recomendaciones citadas en los reportes de catástrofes provocadas por el colapso de estos muros alrededor del mundo, es el monitoreo periódico de las condiciones de no saturación establecidas en el diseño de la presa. Los umbrales de activación de dichos monitoreos pueden consecuentemente ser ingresados en los Planes de Acción para Implementación de Respuesta (Trigger Action Response Plan - TARP) [46] para mitigar los efectos oportunamente.

Una de las metodologías de monitoreo que se ha utilizado cada vez más para la detección de erosión interna e infiltración en los muros de contención de relaves, es a través de la observación de la resistividad eléctrica, especialmente utilizando la técnica de **tomografía de resistividad eléctrica (ERT)** y su correlación con la ley empírica de Archie. Si bien, la técnica de ERT permite una caracterización de la resistividad del terreno en profundidad, la conversión de ésta a porcentaje de humedad no es simple, ya que: el grado de saturación, la presión de capas suprayacentes e interferencias en la superficie debido a falta de un adecuado contacto con los sensores, dificultan la obtención de la resistividad real y por ende la relación de la resistividad con el contenido de humedad.

En esta tesis se presenta el desarrollo de una metodología alternativa para identificar el contenido de humedad real con la técnica ERT, al correlacionar los resultados de **resistividad** con los valores de **% de humedad** entregados por sensores de humedad de alta frecuencia. Estos sensores se disponen en pozos ubicados en el muro de contención de un tranque de relaves en la mina El Soldado, Chile Central.

Con este objetivo, durante los meses comprendidos entre marzo y agosto 2022, se realiza una campaña de adquisición de perfiles ERT en el Tranque 4 de mina El Soldado (Anglo American). Además, se utilizó el Pozo N°2 para la instalación de sensores de humedad y posterior comparación con los resultados del ERT (pozo perteneciente a una campaña de instrumentalización de pozos de la compañía minera).

Se presentan además, experimentos de laboratorio para verificar el efecto de presión y saturación de agua en sensores de humedad enterrados en el material obtenido de una columna de relave. Y también se realizan experimentos de dopado de electrodos para mejorar el contacto eléctrico con el suelo (transmisión de la corriente).

Los resultados de este trabajo establecen un procedimiento para la utilización de sensores de humedad en conjunto con la técnica de ERT para la identificación de humedad en muros de tranques de relave, específicamente en relaves de arenas finas.

# Tabla de contenido

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	1
<b>1.1 INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	3
<b>1.3 ALCANCES</b> .....	4
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	6
<b>FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	6
<b>2.1 INTRODUCCIÓN</b> .....	6
<b>2.2 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA (ERT)</b> .....	6
<b>2.2.1 VALOR DE RESISTIVIDAD</b> .....	8
<b>2.2.2 PROCESO TOMOGRAFICO DE DATOS GEOELÉTRICOS</b> .....	9
<b>2.3 SENSORES DE HUMEDAD DE ALTA FRECUENCIA</b> .....	19
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	21
<b>METODOLOGÍA</b> .....	21
<b>3.1 INTRODUCCIÓN</b> .....	21
<b>3.2 DEFINICION DE LA CAMPAÑA DE ADQUISICIÓN</b> .....	23
<b>3.3 ADQUISICIÓN DE SENSORES DE HUMEDAD EN TRANQUE DE RELAVES</b> .....	24
<b>3.4 ADQUISICIÓN DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA (ERT) EN TRANQUE DE RELAVE</b> .....	25
<b>3.5 EXPERIMENTACIÓN SENSORES DE HUMEDAD DE ALTA FRECUENCIA EN LABORATORIO</b> .....	27
<b>3.6 EXPERIMENTACIÓN ELECTRODOS CON DIFERENTES TAZAS</b> .....	29
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	32
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	32
<b>4.1 INTRODUCCIÓN</b> .....	32
<b>4.2 MODELO DE SENSIBILIDAD</b> .....	32
<b>4.3 RESULTADOS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA (ERT)</b> .....	35
<b>4.4 RESULTADOS DE SENSORES DE HUMEDAD DE ALTA FRECUENCIA</b> .....	39
<b>4.5 RESULTADOS DE TIME LAPSE ERT</b> .....	40
<b>4.6 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	41
<b>4.7 DISCUSIÓN</b> .....	42
<b>CONCLUSIONES</b> .....	47
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	48

# CAPÍTULO 1

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 INTRODUCCIÓN

La principal estrategia adoptada a nivel mundial para el manejo de relaves ha sido la construcción de tranques de relaves. El diseño de estas estructuras ha mejorado significativamente en las últimas décadas debido a la experiencia y los avances en la investigación aplicada. Sin embargo, aún existen una serie de incertidumbres ambientales y geomecánicas asociadas con la respuesta de estas estructuras [1]. Ejemplos de colapsos de muros de tranques, debido a factores como variaciones en los niveles freáticos, infiltraciones, saturación interna del muro y licuefacción, han sido identificados alrededor del mundo (Figura 1)[17], como en Cadia Valley - Australia [11] y Bento Rodríguez - Brasil [14].

Uno de los reportes de análisis de las fallas de lo sucedido en Cadia Valley [11] concluye con el siguiente extracto:

*“it is essential to continually demonstrate by monitoring that the assumed unsaturated conditions in the buttress persist if relied upon in the design and that the buttress is behaving as intended.”*

Una de las recomendaciones de mejoras que menciona es el monitoreo periódico y preciso, que muestre que el muro se mantiene en las condiciones no-saturadas de diseño, por lo que métodos de monitoreo indirecto que identifiquen la cantidad de humedad y saturación en el muro, ayudarán sin duda a la observación oportuna de la formación de estos acontecimientos [21].

Las causas más frecuentes de fallas en los muros de tranques de relaves están relacionadas con la acción del agua que resulta en desbordes, inestabilidad de pendientes, filtraciones y fallas de cimientos [17]. En este contexto, el monitoreo de muros de tranques relaves, y también de pilas de lixiviado y botaderos de ripsos mediante técnicas geofísicas ha tenido un interés creciente durante los últimos años en el campo minero [22].

MINE/PROJECT & LOCATION	ORE TYPE	ICOLD INCIDENT CLASSIFICATION			INCIDENT YEAR
Brumadinho, Mina Córrego do Feijão, Minas Gerais, Brazil (Vale)	Fe	1	B	SI	2019
Fundao-Santarem (Germano), Minas Gerais, Brazil (Samarco = Vale & BHP)	Fe	1	A	ST	2015
Imperial Metals, Mt Polley, British Columbia, Canada	Cu Au	1	A	FN	2014
Dan River Steam Station, North Carolina (Duke Energy)	Coal	1	A	ST	2014
Ajka Alumina Plant, Kolontár, Hungary (MAL Magyar Aluminum)	Al	1	A	SE	2010
Cuajone mine, Torata water supply dam, Peru	Cu	3	A	EQ	2001
Aitik mine, near Gällivare, Sweden (Boliden Ltd)	Cu	1	A	ER	2000
Los Frailes, near Seville, Spain (Boliden Ltd.)	Pb Zn	1	A	FN	1998
Laisvall (Boliden), Sweden	Pb,Zn, Ag	1	A	ER	1996

ICOLD INCIDENT CLASSIFICATIONS			
INCIDENT TYPE KEY		INCIDENT CAUSE CLASSIFICATIONS	
<b>1A</b>	Active Dam Failure	<b>SI</b>	Slope instability - static failure
<b>1B</b>	Inactive Dam Failure	<b>SE</b>	Seepage - seepage and internal erosion
<b>2A</b>	Active Tailings Accident	<b>FN</b>	Foundation - structural and foundation conditions, foundations with insufficient investigations
<b>2B</b>	Inactive Tailings Accident	<b>OT</b>	Overtopping
<b>3</b>	Groundwater	<b>ST</b>	Structural - structural inadequacies, inadequate or failed decants
		<b>EQ</b>	Earthquake - seismic instability
		<b>MS</b>	Mine Subsidence
		<b>ER</b>	Erosion - external erosion
		<b>U</b>	Unknown

FIGURA 1. EXTRACTO DE "TSF FAILURES REPORT".

El monitoreo de resistividad a través de ERT ha demostrado ser una de las herramientas que brindan una buena caracterización del subsuelo para la detección de erosión interna y la evaluación de filtraciones para evaluar los riesgos ambientales potenciales y la estabilidad física de los muros [5,13,15,9]. Además, las técnicas integradas de datos geotécnicos, geofísicos y geoquímicos se han utilizado para correlacionar, ajustar y aumentar la caracterización [6,8,20].

Sin embargo, al utilizar la técnica ERT en el monitoreo de tranques de relaves, se debe asegurar que la medición se realice con una resolución y rango de profundidad adecuados a los objetivos a observar, y que sus resultados, originalmente con unidades de resistividad, se pueda correlacionar con el contenido de humedad del muro. De acuerdo con la relación entre humedad y resistividad que propone la ley empírica de Archie [2], sabemos que no es una condición lineal entre ambas variables, sino que depende de otras características, como la porosidad y la conductividad del agua [7], y la compactación o confinamiento que, aunque no es un efecto observado, sí tiene un efecto en la resistividad observada.

En esta tesis se realiza la adquisición de ERT en el talud del muro frontal del tranque de relave, en conjunto con la instalación de sensores de humedad en un pozo ubicado en la intersección de los perfiles.

## 1.2 OBJETIVOS

El principal objetivo de esta Tesis es establecer una metodología para la identificación del contenido de humedad en el talud de un muro de Tranque de relaves aplicando tomografía de resistividad eléctrica (ERT) y la utilización de sensores de humedad de alta frecuencia.



FIGURA 2. FOTOGRAFÍA SATELITAL DEL TRANQUE SELECCIONADO. TRANQUE N°4, MINERA EL SOLDADO.

Para verificar el funcionamiento de los sensores de humedad, aunque existe una dificultad intrínseca de contar con testigos en profundidad, se utilizará muestras de relaves extraídos en la construcción de los pozos de la campaña. Dichas muestras se utilizarán para fabricar una columna de pruebas para verificar el efecto de humectación, saturación, compactación y secado.

Los objetivos específicos cubiertos son:

1. Corroborar que las resistividades medidas por la campaña ERT son las existentes en profundidad.
2. Comprobar el funcionamiento de los sensores de humedad en laboratorio.
3. Identificar el contenido de humedad en el tranque 4 de minera El Soldado.

El procedimiento que se usará para cubrir estos objetivos es:

1. Compilar los registros piezométricos, litología de pozos y la ingeniería de construcción de los tranques para caracterizar el muro.
2. Realizar las mediciones en terreno que permitan obtener una tomografía de resistividad eléctrica.
3. Obtener, mediante la modelación de los datos medidos, perfiles de resistividad en profundidad del muro del tranque, incluyendo el talud.
4. Interpretar los perfiles de resistividad utilizando los datos de los sensores de humedad instalados en pozos.
5. Identificar potenciales áreas con potenciales focos de humedad dentro del muro.
6. De acuerdo con los resultados obtenidos, se establecerá limitaciones y alcances de la metodología propuesta.

### **1.3 ALCANCES**

Los alcances de esta tesis incluyen obtener la información para identificar la naturaleza de las variaciones resistivas y para comprobar el funcionamiento tanto de ERT como de los sensores de humedad. Se realizarán pruebas en laboratorio para los sensores de humedad, y se utilizarán informes históricos de litología del muro del tranque.

Luego para la adquisición de la técnica de ERT en terreno, el departamento de Geofísica de la Universidad de Chile pone a disposición el equipo IRIS Syscal ERT de 48 canales con el cual se puede cubrir hasta 240 metros de línea de medición. Con los parámetros seleccionados, primeramente, se buscará una identificación de la base del tranque, de modo de situarnos dentro de él. Para esto se utilizará el mayor espaciamiento en los cables provistos (5 metros), logrando en el arreglo de adquisición llamado “dipolo-dipolo”, con lo que se obtiene una resolución estimada de 2,5 metros y una profundidad máxima esperada de 41 metros. En la siguiente Figura 3. se puede ver la nube de puntos a medir en superficie, en su ubicación estimada en profundidad.

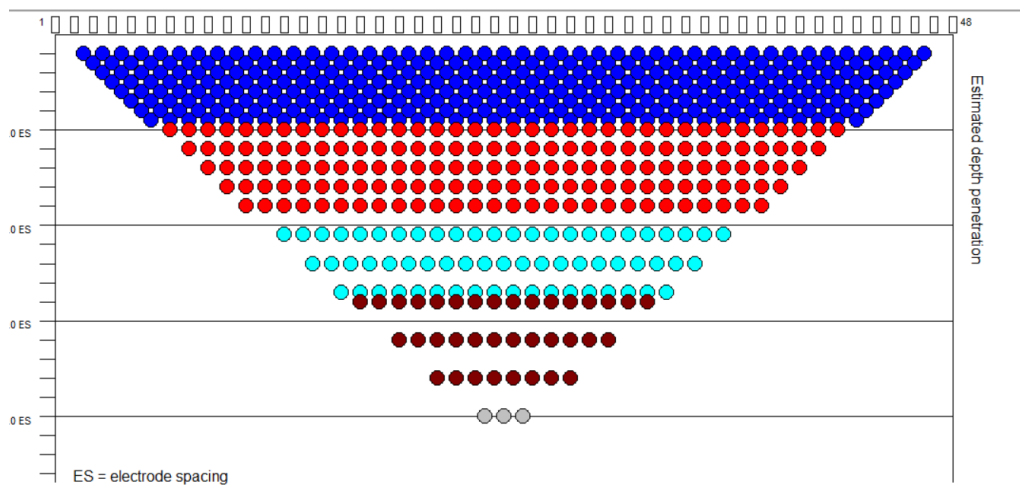


FIGURA 3. REPRESENTACIÓN DE LA UBICACIÓN EN PROFUNDIDAD DE LOS PUNTOS DE LECTURA DEL ARREGLO ERT DIPOLO-DIPOLO PARA 48 CANALES.

El siguiente paso consiste en la correlación de los resultados de la adquisición tomográfica con la información reunida del tranque, para ajustar y comprobar la distribución de resistividades en profundidad.

Una tercera etapa consiste en interpretar los resultados de ERT para entregar potenciales áreas o zonas de mayor humedad. Primeramente, identificando los efectos anómalos pertenecientes a estructuras y/o variaciones de compactación o tipo de material, para poder aislar la variación resistiva posiblemente producida por la humedad o concentración de líquidos en el área de estudio. Y segundo, se utilizarán los datos de sensores de humedad en pozos para correlacionar los estratos o cambios bruscos de resistividad y grado de saturación medidos por estos.

En resumen, las etapas para la ejecución de esta investigación son:

- La adquisición de la técnica de tomografía eléctrica 2D el tranque n°4 de minera El Soldado.
- La correlación de sus resultados con piezometría presente en la zona de estudio, e identificación de interferencias al área de observación (como son la topografía, litología en pozos y otras estructuras).
- Obtener la visualización del contenido de resistividad real presente en profundidad.
- Interpretar el perfil de la zona de estudio a contenido de humedad en profundidad.



# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 INTRODUCCIÓN

En esta investigación se presenta una nueva metodología donde se vinculan los perfiles 3D de ERT con el grado de saturación del suelo mediante el uso de sensores de humedad instalados en pozos cercanos. Los perfiles ERT brindan un perfil de resistividad 2D, y los sensores de humedad pueden medir la resistividad y el volumen de contenido de agua (VWC) en la profundidad de la instalación. Esta segunda medida (VWC) con una porosidad total definida, permite obtener el grado de saturación.

En este capítulo repasaremos los fundamentos teóricos para la definición de la técnica de tomografía eléctrica y la utilización de sensores de humedad de alta frecuencia para la identificación de contenido de agua.

### 2.2 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA (ERT)

La tomografía eléctrica es un conocido método geofísico que entrega la resistividad del subsuelo a distintas profundidades, esta consiste en aplicar corriente y medir potencial. Bajo este principio, dado un modelo convencional de 4 electrodos (dos de corriente C1 y C2, y dos de medición de potencial P1 y P2), el cálculo de voltaje queda expresado de la siguiente manera.

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{C_1 P_1}} + \frac{1}{r_{C_2 P_1}} + \frac{1}{r_{C_1 P_2}} + \frac{1}{r_{C_2 P_2}} \right) \quad (E 1)$$

Las mediciones de resistividad se realizan inyectando corriente en el suelo a través de los dos electrodos de corriente C1 y C2, y se mide la diferencia de potencial eléctrico resultante en dos electrodos de potencial P1 y P2. La resistividad despejada del cálculo de esta ecuación se le conoce como resistividad aparente, ya que es la resistividad que se puede observar en superficie mediante esta excitación de corrientes directas, y tiene relación con la resistividad real en profundidad (el desarrollo teórico en extenso se encuentra desarrollado en las siguientes referencias: [9,29, 31], y es explicado en la sección 2.2.3)

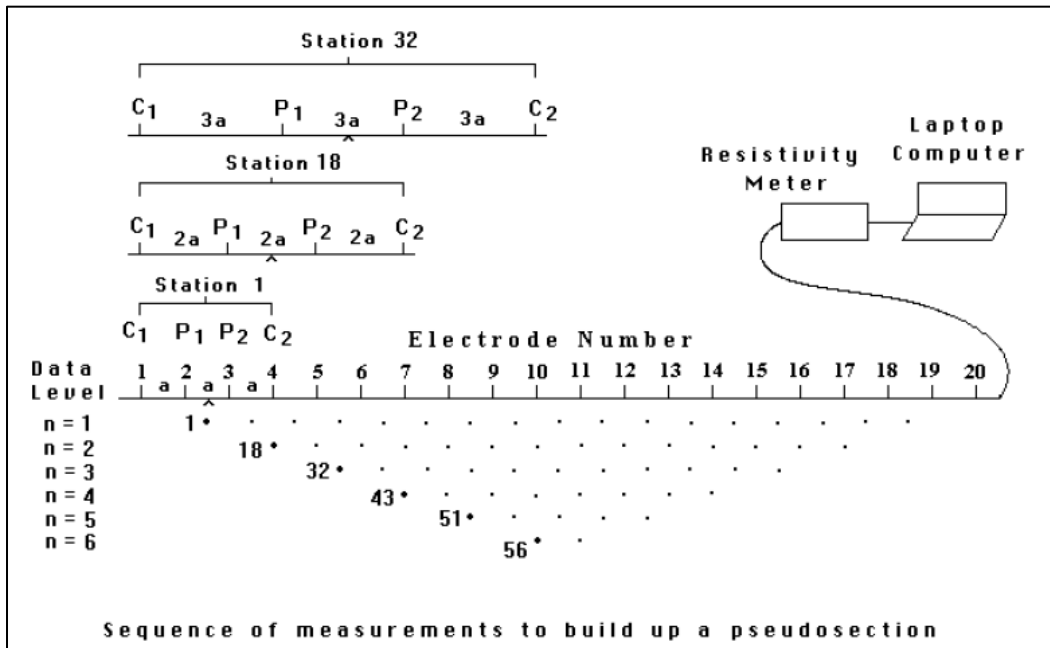


FIGURA 4. SECUENCIA DE MEDICIÓN DEL ARREGLO DE ERT PARA CONSTRUIR LA PSEUDOSECCIÓN.

El método mide la resistividad del medio de la siguiente forma (Figura 4):

En los puntos exteriores C1 y C2 inyecta una corriente determinada. Lo hace a través de un lazo cerrado de distintos niveles de voltaje hasta encontrar el que logra inyectar una cantidad entre 20 y 400mA definiendo el parámetro de Corriente I.

Al mismo tiempo ejecuta la medición de voltaje en las dos puntas centrales P1 y P2 (P de potencial eléctrico), así definiendo el parámetro de Voltaje V o diferencia de potencial  $\Delta\varphi$ .

Con las medidas de I y  $\Delta\varphi$  calcula la resistividad aparente e imaginariamente la presenta en un lugar geométrico del arreglo de electrodos. La profundidad y resistividad reales es resuelta bajo análisis numérico mediante ecuaciones parametrizadas (q) que definen el subsuelo en capas horizontales.

La tomografía resistiva consigue una imagen de la distribución de resistividades del subsuelo en forma remota, es decir, sin disponer de mediciones directas. La información necesaria se registra a través de perfiles de electrodos. A partir de esta información el proceso tomográfico reconstruye la distribución de resistividad dentro del subsuelo, utilizando las propiedades eléctricas del subsuelo.

Durante una medición de resistividad  $\rho_a$ , se ingresa una corriente continua al subsuelo a través de electrodos. La tomografía resistiva registra valores de corriente y de voltaje en un arreglo que tiene cada electrodo instalado. El perfil de tomografía resistiva obtiene para el caso presente aproximadamente 360 puntos, es decir, 60 veces más información. El juego de datos de tomografía resistiva o tomografía eléctrica es equivalente al menos a 10 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) a lo largo de un perfil de 240 m.

La corriente ingresada produce un campo eléctrico, cuya distorsión depende de la distribución de resistividades. El potencial del campo distorsionado, registrado en la superficie, es la medida para reconstruir las resistividades. A partir de la corriente (I) y la tensión (U) se calcula la resistividad aparente ( $\rho_a$ ):

$$\rho_a = k \frac{U}{I} \quad (\text{E } 2)$$

Donde k es el factor geométrico, que se define en función de la configuración geométrica de los electrodos utilizados.

La resistividad  $\rho_a$  no es una resistividad real, sino aparente cuyo valor depende también de la estructura del subsuelo como de la influencia de la configuración de los electrodos. La investigación adecuada involucra la repetición de esta medición, aplicando diferentes geometrías de electrodos para cubrir el área más grande posible. Al final de un levantamiento geoelectrico, se han medido miles de valores, todos con diferentes geometrías. Sin embargo, la entidad de valores de resistividad aparente representa información no interpretable, se requiere transformar esta información en un mapa de resistividades utilizando algoritmos de reconstrucción tomográficos.

### **2.2.1 VALOR DE RESISTIVIDAD**

Para obtener información geológica a partir de los resultados del estudio geoelectrico, se requiere de un conocimiento previo de los valores típicos de resistividad para litologías y materiales distintos y de la geología del sector.

La siguiente tabla extraída de [30], muestra valores de resistividad para rocas comunes. La porosidad también tiene un control fuerte en la resistividad, como el contenido de fluidos y la química de éstos.

Tabla de Propiedades eléctricas para diferentes materiales.

MATERIAL	RESISTIVIDAD ( $\Omega\text{m}$ )	CONDUCTIVIDAD
<b>Rocas Ígneas</b>	$\rho$	
<b>Metamórficas</b>	$\Omega\text{-m}$	Siemens
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalto	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Pizarra	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2.5 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
<b>Rocas Sedimentarias</b>		
Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Lutita	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Caliza	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
<b>Suelos y Aguas</b>		
Arcilla	1-100	0.01-1
Alluvium	10-800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Agua subterránea (dulce)	10-100	0.01-0.1
Agua del mar	0.2	5
<b>Componentes Químicos</b>		
Fierro	$9.074 \times 10^{-8}$	$1.102 \times 10^7$
0.01 M KCl	0.708	1.413
0.01 M NaCl	0.843	1.185
0.01 M Ácido acético	6.13	0.163
Xylene	$6.998 \times 10^{16}$	$1.429 \times 10^{-17}$

## 2.2.2 PROCESO TOMOGRAFICO DE DATOS GEOELÉCTRICOS

El objetivo principal del procesamiento de datos es la reconstrucción y la distribución de resistividades dentro del subsuelo, ubicadas en las profundidades verdaderas, con el mínimo de error posible.

El segundo objetivo del procesamiento de datos es la generación de una imagen, la que represente los datos de resistividad procesados, ubicados en el espacio, de tal forma de poder hacer interpretaciones con respecto a su significado, desde un punto de vista petrofísico.

Realizando un resumen de la historia del procesamiento de datos para adquisiciones geofísicas de corrientes directas [30], podemos comenzar diciendo que hace más de 30 años se desarrolló una técnica para la inversión automática de curvas de SEV [31], en la cual se utilizaba optimización por mínimos cuadrados. Este proceso consistía en ajustar

sucesivamente un modelo inicial hasta que la diferencia entre los datos observados y la curva generada por el modelo, se reducen a un valor mínimo.

Una suposición fundamental de este proceso era que existían tantas capas en el subsuelo como puntos en la curva de campo y que la resistividad verdadera de cada una de estas múltiples capas correspondía al valor de la resistividad asociada a cada punto (Figura 5).

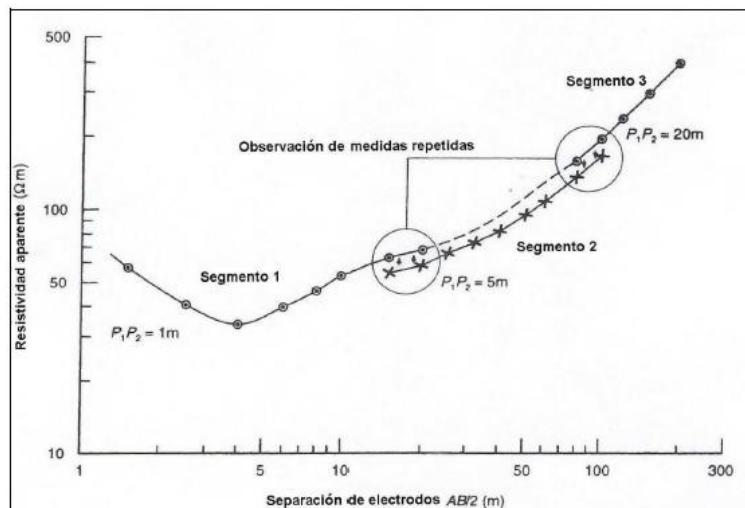


FIGURA 5 SEGMENTOS DESPLAZADOS EN UNA CURVA DE SONDEO SCHLUMBERGER DEBIDO A DIFERENCIAS EN RESISTENCIA DE CONTACTO EN P1 Y P2 A LA HORA DE EXPANDIR LA SEPARACIÓN DE ELECTRODOS DE POTENCIAL. EL SEGMENTO 3 SE DESPLAZA AL NIVEL DEL SEGMENTO 2 QUE A SU VEZ SE DESPLAZA HACIA LA POSICIÓN DEL SEGMENTO 1. DE ESTA FORMA SE PRODUCE UNA CURVA SUAVIZADA LISTA PARA SER INTERPRETADA.

La profundidad media asociada inicialmente a cada capa corresponde al valor de la separación eléctrica a la que fue medida dicha resistividad multiplicada por una constante. El valor de esta constante es tal, que reduce la diferencia entre las curvas de resistividad calculada y observada a un mínimo y se determina a partir de un proceso de prueba-error.

El modelo inicial se usa para generar una curva de sondeo sintética que se compara con la curva de campo. Después se lleva a cabo un proceso iterativo para ajustar las resistividades del modelo mientras se mantienen fijos los valores de los extremos de la curva. Después de cada iteración se calcula la curva teórica y se compara con la curva de campo. Este proceso se repite hasta que la diferencia de la raíz entre las dos curvas alcanza un mínimo (Figura 5). Existe un buen número de programas de inversión disponibles, tanto comerciales [9], como gratuitamente que utilizan esta metodología. Además de los programas de inversión

mencionados existen muchos otros que han sido creados, asociados con cierto equipo de campo y también como desarrollos específicos para la generación de imágenes tomográficas reales (ejemplos [32,33,34]).

Los paquetes de inversión para la generación de imágenes están disponibles comercialmente, generalmente relacionados a un estilo particular de adquisición de datos y/o a un equipo de adquisición particular. El modelado directo utilizando el método de elemento finito, se puede llevar a cabo utilizando software disponible comercialmente. A partir de la utilización de esta técnica se puede calcular la respuesta eléctrica y desplegar en pseudo-secciones a partir de la comparación con los datos originales. Este enfoque se usa generalmente para generar geometrías del subsuelo realistas a partir de modelos estructurales definidos (Figura 6) En el método de celdas utilizado por el RES2DINV software, de M.H.Loke [9], para dar un modelo de respuesta 2D, que hace uso del método de elementos finitos [35, 36].

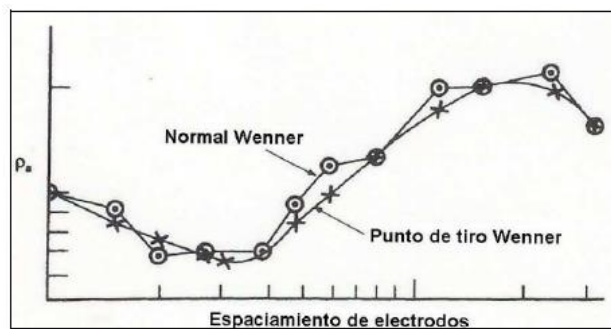


FIGURA 6. CURVAS DE CAMPO DE UN SONDEO WENNER NORMAL (CÍRCULOS), QUE MUESTRA LOS EFECTOS DEL DESPLAZAMIENTO DE LOS ELECTRODOS DE POTENCIAL Y DE UN SONDEO WENNER OFFSET, QUE MUESTRA MENOS SENSIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE ELECTRODOS.

En todos los métodos de optimización, modifican un modelo inicial de manera iterativa, de forma que la diferencia entre la respuesta del modelo y los valores rms de los datos observados. El conjunto de los datos observados se puede escribir como un vector columna y dado por:

$$\mathbf{y} = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (\text{E } 3)$$

Donde m es el número de mediciones. La respuesta modelo f puede escribirse de una forma similar

$$\mathbf{f} = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (\text{E } 4)$$

Para los problemas de resistencia, es una práctica común utilizar el logaritmo de los valores de resistividad aparente, de los datos observados, de la respuesta del modelo y el modelo en sí mismo como los parámetros con los cuales trabajar internamente. Los parámetros del modelo pueden así ser representados por el siguiente vector:

$$\mathbf{q} = \text{col}(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_n) \quad (\text{E } 5)$$

Donde n es el número de parámetros del modelo. La diferencia entre los datos observados y la respuesta del modelo viene dada por el vector de discrepancia  $\mathbf{g}$  que se define por:

$$\mathbf{g} = \mathbf{y} - \mathbf{f} \quad (\text{E } 6)$$

En el método de optimización de mínimos cuadrados, se modifica iterativamente el modelo inicial de manera que se minimice el error E, el cual se obtiene de la diferencia entre la respuesta del modelo y los datos medidos.

$$E = \mathbf{g}^T \mathbf{g} = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (\text{E } 7)$$

Para reducir el valor de error anterior, aplicamos la ecuación de Gauss-Newton (e 8) para determinar el cambio en los parámetros del modelo, que deberá reducir la suma de cuadrados de error [37].

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} \Delta \mathbf{q}_i = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (\text{E } 8)$$

Donde  $\Delta \mathbf{q}$  es el vector de parámetros de cambio del modelo, y J es la matriz Jacobiana (de tamaño m por n) de derivadas parciales. Los elementos de la matriz Jacobiana vienen dados por:

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (\text{E } 9)$$

Que es el cambio en la i-ava respuesta del modelo, debido a cambios en los parámetros del j-vo modelo. Después de calcular el vector de cambio de parámetros, un nuevo modelo se obtiene:

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + \Delta \mathbf{q}_k \quad (\text{E } 10)$$

En la práctica, la ecuación simple de mínimos cuadrados (e 8) rara vez se utiliza en inversión de geofísica.

En algunas situaciones, el producto de la matriz  $J^T J$  puede ser singular, y por lo tanto, la ecuación de mínimos cuadrados no tiene una solución para  $\Delta \mathbf{q}$ .

Otro problema común es que la matriz de los productos de  $J^T J$  es casi singular. Esto puede ocurrir si el modelo inicial del cual se inicia la iteración es muy diferente del modelo óptimo que se debiera utilizar. El vector de cambio calculado desde los parámetros, utilizando ecuación (e 8) pueda tener componentes que son demasiado grandes, que el nuevo modelo calculado con (e 10) pueda tener valores que no son realistas. Un método común para evitar este problema es la modificación Marquardt-Levenberg [37] a la de Gauss-Newton ecuación que viene dada por.

$$(J^T J + \lambda I) \Delta \mathbf{q}_k = J^T \mathbf{g} \quad (\text{E } 11)$$

Donde  $I$  es la matriz identidad. El factor  $\lambda$  es conocido como el factor de amortiguamiento o de Marquardt, y este método también se conoce como el método de regresión cresta [38]. El factor de amortiguamiento restringe efectivamente el rango de valores que los componentes del vector  $\Delta \mathbf{q}$  de cambio pueden tomar. Si bien el método de Gauss-Newton de la ecuación (e 10), intenta minimizar la suma de cuadrados del vector de diferencia. La modificación del método de Marquardt-Levenberg también minimiza la magnitud del vector diferencia y además el parámetro cambio del vector.

Esta última ecuación, puede ser expresada de la siguiente manera:

$$(J^T J + uF) \mathbf{d} = J^T \mathbf{g} \quad (\text{E } 12)$$

Donde:

$F$  = Matriz de alisamiento

$J$  = Matriz Jacobiana de derivadas parciales

$J^T$  = Matriz Jacobiana transpuesta

$u$  = Factor de amortiguación

$\mathbf{d}$  = Vector de perturbación del modelo



$\mathbf{g}$  = Vector de discrepancias

Este último vector de discrepancias,  $\mathbf{g}$ , contiene la diferencia entre los valores de resistividad aparente medidos y los valores calculados. La magnitud de este vector es calculada como el valor rms. Esta es la cantidad que el método de inversión intenta reducir durante la búsqueda del mejor modelo después de cada iteración.

El vector de perturbación del modelo,  $\mathbf{d}$ , es el cambio en los valores de resistividad del modelo, calculados usando la ecuación (e 12). Normalmente éste corresponde a un valor “mejorado” del modelo.

El factor de amortiguación  $\mathbf{u}$ , controla el peso otorgado a la suavidad del modelo en el proceso de inversión. Mientras más grande es el factor de amortiguación, más suave será el modelo. Pero el error RMS de la resistividad aparente, será probablemente más alto. En este caso el modelo no puede satisfacer el componente de alta frecuencia, lo que aumenta el error RMS.

El modelo restringido a variaciones suaves descrito por la ecuación (e 12), puede ser modificado de varias formas, para mejorar los resultados en algunos casos específicos.

Los elementos de la matriz de alisamiento  $F$ , pueden ser modificados de tal forma, que se enfatizan los cambios horizontales (o verticales) de resistividad en el modelo resultante. En la ecuación indicada, se otorga a todos los puntos el mismo peso. En algunos casos, especialmente en presencia de datos con ruido, o sea un número (reducido) de datos con resistividades anómalamente altas o bajas, se puede reducir el efecto de estos puntos en el resultado de la inversión utilizando una matriz de coeficientes de peso.

La ecuación (e 12) trata de minimizar el cuadrado de las variaciones espaciales, o rugosidad, de los valores de resistividad del modelo. Esto tiende a producir un modelo con una variación suave de dichos valores. Esto es aceptable, cuando la variación real de la resistividad del subsuelo varía realmente en forma suave. Hay casos en que la geología consiste en una serie de regiones que son internamente cuasi-homogéneas, pero con bordes abruptos entre regiones. En estos casos se obtienen mejores resultados con una inversión que minimiza los cambios *absolutos* de las resistividades del modelo. Esto último se llama *inversión robusta*.

Este método es comúnmente utilizado con éxito en la inversión de resistividad para datos de sondeo provenientes de un sin número de diversas locaciones a través de todo mundo, en donde el modelo se compone de un pequeño número de capas.

Por ejemplo, con tres capas (es decir, cinco parámetros del modelo). Sin embargo, cuando el número de parámetros del modelo es grande, como en modelamiento de inversión 2D y 3D que constan de un gran número de celdas pequeñas, el modelo producido por este método puede tener unas distribuciones irregulares de resistividad, es decir resistividades espurias con altos o bajos valores en algunas zonas [39].

Para superar este problema, el método de Gauss-Newton de mínimos cuadrados se modificó nuevamente el fin de minimizar las variaciones espaciales de los parámetros en el modelo (Es decir, los valores de la resistividad en el modelo cambian de una manera suave o gradual). Este método smoothness-constrained (suavidad constreñida) de mínimos cuadrados [40], incluye las siguientes formas matemáticas:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \quad (\text{E } 13)$$

Dónde

$$F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z \quad (\text{E } 14)$$

$C_x$ ,  $C_y$  y  $C_z$  son las matrices de suavizado en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Y por otro lado,  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  y  $\alpha_z$  son el peso relativo dado a los filtros de suavidad en  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Una forma común para las matrices de suavizado, es la diferencia de primer orden de la matriz [41] que viene dada por:

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \square & \square & \square & \dots & \square & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & \dots & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square & \dots & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square & \square & \dots & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{E } 15)$$

La ecuación (e 14) también trata de minimizar los square (raíces cuadradas) de los cambios espaciales, o rugosidades, de los valores del modelo de resistividad. De hecho, es una norma L2 de suavizado con restricciones en el método de optimización. Esto tiende a producir un modelo con una variación suave de los valores de resistividad. Este enfoque es aceptable, si la resistividad del subsuelo real varía en una forma suave y gradual. En algunos casos, la geología del subsuelo se compone de una serie de regiones que en su interior son casi homogéneas, pero con fronteras nítidas entre las diferentes regiones, es decir, con bordes

muy contrastantes en términos resistivos. Para tales casos, la formulación de la inversión en (e 14) puede ser modificada de modo que reduce al mínimo los cambios absolutos en el modelo de valores de resistividad [42]. Esto a veces puede dar resultados significativamente mejores. Técnicamente esto se conoce como norma L1 smoothness-constrained para el método de optimización, o más comúnmente conocido como un método de inversión bloque. Un gran número de técnicas pueden ser utilizadas para tal modificación. Un sencillo método para aplicar el método de optimización basado en la norma L1 con la formulación estándar de mínimos cuadrados es la iteración ponderada del método de mínimos cuadrados [43]. La optimización ecuación en (e 14) se modifica para expresar lo siguiente:

$$(J^T J + \lambda F_R) \Delta q_k = J^T R_d g - \lambda F_R q_k \quad (E 16)$$

Con,

$$F_R = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z \quad (E 17)$$

Donde  $R_d$  y  $R_m$  son matrices de ponderación introducidas de manera que los diferentes elementos de los datos vectoriales de rugosidad no se desajusten y con ello el modelo le da el mismo peso en el proceso de inversión a través de las sucesivas iteraciones ponderadas.

Hemos mencionado que el método de mínimos cuadrados se utiliza para calcular ciertas características físicas del subsuelo, los parámetros del "modelo", desde las mediciones de resistividad aparente. Los "parámetros del modelo" son establecidos por la manera en que el subsuelo y sus diferentes regiones son cuadrículados. La Figura 7 muestra las diversas posibilidades que se pueden utilizar. El método más comúnmente usado en la interpretación 2D (y 3D) es una celda base para el modelo que subdivide el subsuelo en celdas rectangulares. Las posiciones de las celdas se fijan y luego sólo las resistividades de las celdas pueden variar durante el proceso de inversión. Los parámetros del modelo son entonces la resistividad de cada celda. En el ejemplo que se muestra en la Figura 7a, los parámetros del modelo son los setenta y dos valores de resistividad de las celdas 1 a 72. Un enfoque radicalmente diferente es un método de inversión basado en límites. Este método subdivide el subsuelo a diferentes regiones. La resistividad se supone que es homogénea dentro de cada región. La resistividad se permite cambiar de forma arbitrariamente a través de las fronteras, y por lo tanto útil en áreas con transiciones abruptas en la geología. La resistividad de cada región y las profundidades a las fronteras se cambian por el método de optimización de mínimos cuadrados para que los valores calculados de resistividad aparente coincidan con los valores observados. Los "parámetros del modelo" por ejemplo que se muestra en la Figura 7b son los dos valores de resistividad (1 y 2) y las profundidades

en cinco puntos (Z1 a Z5) a lo largo de la frontera que da un total de siete parámetros. Si bien este método funciona bien para datos sintéticos a partir de modelos numéricos, en la mayoría de los datos de campo puede llevar a resultados altamente inestable con oscilantes fronteras [44]. Su mayor limitación es, probablemente, la asunción de una resistividad constante dentro de cada región. En particular, los cambios laterales en la resistividad cerca de la superficie tienen un efecto muy grande en los valores de resistividad aparente medidos. Puesto que este modelo no tiene en cuenta tales cambios laterales, y son a menudo culpables de las equivocaciones en el modelo a cambios en las profundidades de los límites. Los esfuerzos más recientes han sido en la combinación de la celda de base y en la celda límite como base en métodos de inversión. Uno de estos métodos es el método de la inversión limitada lateralmente [45]. En este método, los cambios laterales (pero no, cambios verticales) se permiten en cada región, y las transiciones abruptas en todo el límite también están permitidas.

Los parámetros "modelo" para el ejemplo en la Figura 7c son entonces de veinticuatro valores de resistividad (1 y 24) y las profundidades son solo trece puntos (Z1 a Z13) a lo largo de la frontera con un total de treinta y siete parámetros. Información de otras fuentes, como los datos de perforación o sísmica, se puede utilizar para proporcionar una estimación inicial de la profundidad del límite. Una situación común es cuando la información de profundidad se encuentra disponible en un solo pozo. En este caso, el límite inicial normalmente se establece una profundidad constante. El método de inversión después ajusta la profundidad en una serie de puntos a lo largo de la frontera durante el proceso de inversión. Un smoothness-constraint se aplica para minimizar los cambios en las profundidades entre puntos adyacentes en la misma frontera. Este método funciona particularmente cuando el subsuelo se compone de varias zonas sedimentarias. Una generalización de este concepto es permitir que existan tanto cambios verticales como cambios laterales dentro de cada región (como en un modelo de celda pura), además de facilitar los cambios abruptos en los límites. El modelo de la Figura 7d tiene setenta y dos valores de resistividad y cinco valores de profundidad, dando un total de setenta y siete parámetros del modelo. Este tipo de discretización es particularmente útil cuando, cerca de la superficie ocurren heterogeneidades que poseen diferentes profundidades para sus capas superiores, teniendo un gran efecto en los valores de resistividad aparente medidos. Las celdas modelo utilizadas hasta ahora solo han tomado formas rectangulares (Figura 7a,b,c y d)[9]. Es en parte debido a la utilización del método de diferencias finitas para el cálculo del modelo de resistividad aparente, donde una ligera desventaja es que el límite se aproxima atravesando por una serie de celdas rectangulares.

Por otro lado, donde se muestra una variación posible, es utilizando el método de elementos finitos con las celdas de forma trapezoidal y con los bordes de las celdas adyacentes a la frontera ajustándose a la forma real de la frontera (Figura 7e)[47,48].



### 2.3 SENSORES DE HUMEDAD DE ALTA FRECUENCIA

Para medir el grado de saturación, se utiliza el método de medición de la propiedad dieléctrica del suelo. El cambio de la constante dieléctrica del suelo  $\varepsilon$  puede reflejar el cambio del contenido volumétrico de agua  $\Theta_v$  [23][25], o también llamado por sus siglas en inglés *VWC* (Volumetric Water Content) [26] representada en la siguiente fórmula, donde  $a$  y  $b$  son los parámetros de calibración según los diferentes tipos de suelo.

$$\Theta_v = a\sqrt{\varepsilon} + b \quad (\text{E } 18)$$

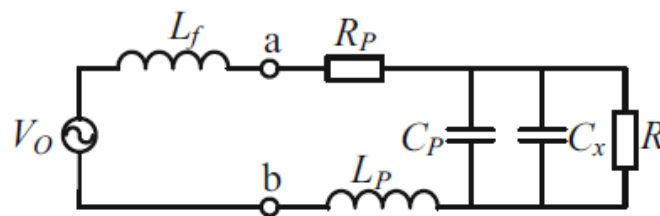
En específico, esta fórmula tiene sus constantes calculadas para suelos minerales [24], donde *RAW* es la propiedad dieléctrica medida por el sensor de humedad modelo TEROS 12 de la marca Meter Group, usado en estos ensayos.

$$VWC = \Theta_v \left( \frac{m^3}{m^3} \right) = 3.879 \times 10^{-4} \times RAW - 0.6956 \quad (\text{E } 19)$$

Cuando el sensor de humedad funciona, la capacitancia equivalente del sensor esta usualmente relacionada con el medio circundante [27]. La relación entre la constante dieléctrica y la capacitancia encontrada está relacionada por un factor geométrico  $\delta$  del sensor.

$$C_x = \delta\varepsilon \quad (\text{E } 20)$$

El método de medición de la propiedad dieléctrica utiliza el principio del circuito de resonancia, donde el circuito resonante es representado como se muestra a continuación.



El funcionamiento comienza con la estimulación del suelo mediante una señal  $V_o$  de alta frecuencia (70 Mhz), que se conduce entre las placas con una inductancia fija  $L_f$ , una inductancia parasita  $L_p$ , resistencia  $R_p$  y conductancia  $C_p$ . Luego el suelo es representado por una resistencia  $R$  y una capacitancia  $C_x$ . Entonces, la solución de impedancia del circuito se muestra a continuación.

$$Z = R_p + \frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2} + j \left[ \omega L - \frac{\omega R^2 C}{1 + \omega^2 R^2 C^2} \right] \quad (\text{E } 21)$$

Donde,

$$L = L_f + L_p, C = C_p + C_x$$

Entonces, la condición del circuito resonante debe cumplir lo siguiente.

$$\omega L = \frac{\omega R^2 C}{1 + \omega^2 R^2 C^2} \quad (\text{E 22})$$

Y la frecuencia angular resonante puede calcularse como sigue, donde  $1/LC > 1/R^2 C^2$ .

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{R^2 C^2}} \quad (\text{E 23})$$

Por lo que sabiendo los valores de  $f_0$  y R, podemos calcular la capacitancia  $C_x$  del suelo y deducir el contenido volumétrico de agua o VWC.

También con esto, podemos calcular el grado de saturación de agua de un suelo, utilizando la porosidad total  $\phi$ .

$$\phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (\text{E 24})$$

$\rho_b$  densidad del suelo seco (ej.  $1.5 \text{ Mg/m}^3$ )

$\rho_s$  densidad del mineral (ej.  $2.65 \text{ Mg/m}^3$ )

$$\text{Grado de saturación del suelo} = \frac{\text{VWC}}{\phi} \quad (\text{E 25})$$

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA

### 3.1 INTRODUCCIÓN

El error entre valor real de resistividad a una profundidad específica y el medido en superficie en una adquisición de ERT, se produce debido a varios factores descritos en la ley empírica de Archie, entre ellos la porosidad, que es afectada por la presión de confinamiento en profundidad.

El método usual para relacionar la resistividad con el % de Saturación o % de humedad, es a través de pruebas de laboratorio para estimar los factores definidos en la ley de Archie.

La ley empírica de Archie [49] dice:

$$\rho = (\alpha \rho_w n^{-m}) S_r^{-p}$$

Donde

$\rho$	es la resistividad real del medio
$\alpha$	parámetro del suelo
$\rho_w$	resistividad de la solución contenida
$n, m$	porosidad y el índice m (factor de cementación)
$S_r, p$	% de saturación y el índice p (coeficiente de saturación)

Ahora, la alternativa de enfoque práctico para relacionar la resistividad y la humedad o % de Saturación, es la que se presenta en esta tesis como metodología alternativa, donde a través de la instalación de sensores de humedad de alta frecuencia en el área de estudio (los que se definen en la sección 2.3) se logra realizar el paso de resistividad a % de Saturación.

La idea principal de esta nueva metodología se basa en la instalación de estos sensores de humedad en pozos del talud del muro de tranques de relaves, e idealmente que estos pozos estén cerca o cruzando los perfiles de ERT para hacer coincidir puntos de evaluación en profundidad. Esta solución, es una solución empírica para evitar pruebas de suelo excesivas



y para aproximar la obtención de la resistividad real y el grado de saturación de agua en profundidad e insitu.

De las medidas del sensor de humedad ( $\rho$ ,  $VWC$ ) en el pozo, podemos pensar que de la ley empírica de Archie pensemos que se puede aproximar o modelar sus parámetros como constantes ( $k, p$ ) de los datos adquiridos, y establecer una relación entre la resistividad y el % de Saturación de forma inmediata.

$$\rho = k S_r^{-p} = K \cdot VWC^{-p}$$

Donde

$$\text{Porosidad Total} = \phi = \frac{\rho_b}{\rho_s} = \frac{\text{densidad del suelo}}{\text{densidad de los minerales}}$$
$$S_r = \frac{VWC}{\phi}$$

Por lo tanto, en resumen, una metodología alternativa para la identificación del contenido de humedad en un muro de tranque de relave, se ha presentado con la inclusión de sensores de humedad que miden la relación que establece la ley empírica de Archie de forma insitu en terreno, lo que también podría ayudar a realizar monitoreos continuos de ERT con mayor precisión en la interpretación que se realiza de identificación de % de Saturación. Sin embargo, existen limitaciones en la medición, las que se pueden mitigar de la siguiente manera:

- a) Mejorar el contacto de los electrodos con las arenas. Mediante la construcción de tazas de material con agua y bentonita sódica (ver sección 3.6)
- b) Medir periódicamente en el tiempo (time lapse). Para asegurar que los cambios de resistividad corresponden a cambios de cantidad de agua dentro del material, y no artefactos de medición o inversión (ver sección 4.5).
- c) La obtención de la resistividad en profundidad mediante una lectura directa en pozos nos entrega una mejor precisión en la medida de resistividad observada por la tomografía eléctrica. La que utilizaremos como corrección proporcional a todo el perfil de ERT, para luego obtener el grado de saturación mediante la medición del contenido volumétrico de agua (VWC), ver sección 2.3 y 3.3.

### 3.2 DEFINICION DE LA CAMPAÑA DE ADQUISICIÓN

Primero necesitamos definir perfiles sobre un muro de relaves que deseamos monitorear, donde existen o se vayan a realizar pozos con piezometría. Es el caso de la campaña realizada entre Febrero y Agosto 2022 en el Tranque 4 de la minera El Soldado (Figura 8), que incluyó la realización de un pozo con piezometría hasta 30 metros de profundidad.

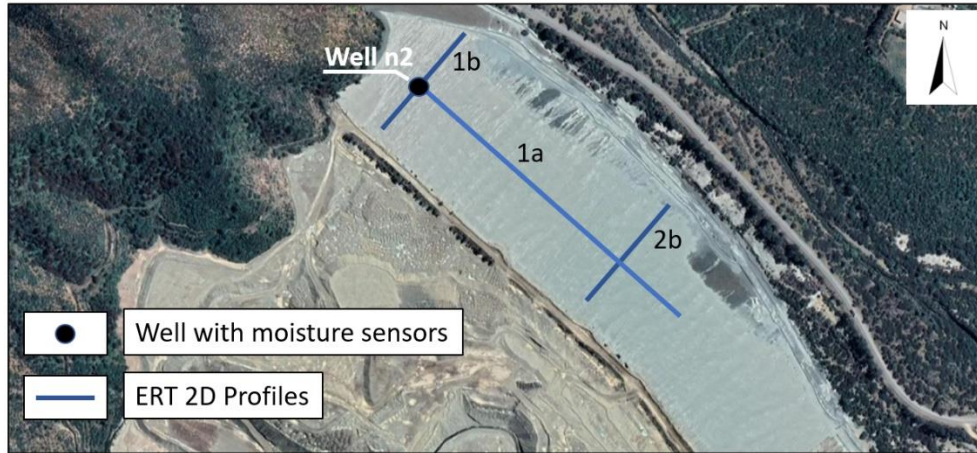


FIGURA 8. MAPA VISTA SUPERIOR DEL ERT Y LA CAMPAÑA DE DETECCIÓN DE POZOS EN TRANQUE 4.

Se realizó la adquisición de 3 perfiles con la técnica ERT, 2 de ellos de 240 metros de largo (nombrados como: 1b y 2b), y un perfil transversal de 600 metros (llamado 1a). Para la adquisición de los perfiles ERT y la instalación de 2 sensores de humedad en pozo n2 se definieron las siguientes actividades y tiempos de desarrollo.

Actividades	día 1	día 2	día 3	día 4	día 5	día 6	día 7	día 8	día 9	día 10	día 11
Acreditación e Ingreso	X										
Instalación Sensores TEROS12 en Pozo 2	X	X	X	X							
Medición de Tomografía Eléctrica:											
Tendido de estacas de medición			X	X	X	X	X	X	X	X	X
Adquisición perfiles longitudinales de Tomografía			X	X	X	X	X	X			
Control de Calidad - repetición								X	X	X	X
Adquisición perfiles transversales de Tomografía									X	X	X

Las actividades de adquisición de la campaña de sensores TEROS12 en pozo 2 es explicada en la sección 3.3, y de ERT en la sección 3.4.

### 3.3 ADQUISICIÓN DE SENSORES DE HUMEDAD EN TRANQUE DE RELAVES

Una vez que hemos seleccionado el área, instalamos al menos 2 sensores de humedad en un pozo a diferentes profundidades (como se muestra en la Figura 9). Uno instalado a 20 metros y otro a 25 metros de profundidad.



FIGURA 9. FOTOS DE LA INSTALACIÓN DEL SENSOR DE HUMEDAD EN EL POZO N 2.

Los sensores de humedad del suelo realizan 2 medidas diferentes (Figura 10), entre dos varillas pequeñas obtienen la conductividad eléctrica (EC) y entre otras dos el volumen de agua contenido (VWC) usando un tipo especial de lectura usando frecuencia.

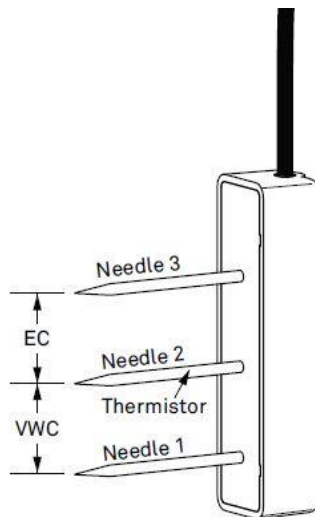


FIGURA 10. REPRESENTACIÓN FÍSICA DEL SENSOR DE HUMEDAD TEROS 12.

La conductividad eléctrica (EC) tiene una relación directa con la resistividad ( $\rho$ ) que no depende de la geometría como lo hace la resistencia. La conductividad es una propiedad del material que describe qué tan bien el material conduce la electricidad. Es el valor

recíproco de la resistividad y se mide en unidades de conductancia/longitud o conductancia  $\times$  longitud/área. Su unidad derivada del SI es el siemens por metro:

$$S / m = A^2s^3m^{-3}kg^{-1} \quad (\text{E 26})$$

La resistividad es una propiedad del material que describe qué tan bien el material aísla la electricidad. Se mide en unidades de resistencia  $\times$  longitud o resistencia  $\times$  área/longitud, respectivamente. La unidad SI es el ohm metro:

$$\Omega \cdot m = kg \cdot m^3s^{-3}A^{-2} \quad (\text{E 27})$$

Entonces, ambas unidades están relacionadas de la siguiente manera:

$$\rho (\text{Ohm} \cdot m) = 1 / EC \quad (\text{E 28})$$

donde EC esta en Siemens/metre

Según el diseño del sensor, el grado de saturación se puede obtener como la relación entre VWC y la porosidad total de la siguiente manera.

$$\text{Grado de saturación del suelo} = VWC / \phi$$

La porosidad total del suelo ( $\phi$ ) se puede calcular de la siguiente manera:

$$\phi = 1 - \rho_b / \rho_s = 1 - 1.5 / 2.65 = 0.43 \quad (\text{E 29})$$

Donde  $\phi$  es la porosidad.  $\rho_b$  es la densidad seca del suelo, que es la densidad del material del tranque de relaves, generalmente mezclas de arena y limo (alrededor de  $1,5 \text{ g/cm}^3$  según estudios previos en tranques de relaves).  $\rho_s$  es la densidad de los minerales (se supone que es de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , como el cuarzo).

Los resultados de porosidad total para densidad entre  $1.4 \text{ g/cm}^3$  y  $1.8 \text{ g/cm}^3$  según estudios previos en tranques de relaves que muestran valores de densidad aparente en los primeros 100 metros de profundidad, revelan valores del 32% al 47% de la porosidad total [18][16].

### **3.4 ADQUISICIÓN DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA (ERT) EN TRANQUE DE RELAVE**

El equipo utilizado para los perfiles ERT es el siguiente:

Tipo: Tomografo – medidor de resistividad eléctrica  
Marca: IRIS instruments  
Modelo: Syscal Pro Switch  
Cantidad de canales: 48  
Extensión de cables de medición: 240 metros  
Espaciamiento entre electrodos: 5 metros



Para la adquisición de perfiles ERT se debe tener en consideración 2 factores importantes.

En la instalación de equipos ERT debemos tratar de reducir la resistencia de contacto en la superficie tanto como sea posible con tazas mezcladas con agua alrededor de los electrodos para reducir la distorsión que se ingresa con el mal contacto en las mediciones (como se muestra en la Figura 11). Pruebas experimentales con diferentes materiales en un grupo de tazas se ha realizado en un terreno de fácil acceso (ver sección 3.6).

Asimismo, la adquisición de estos perfiles reiteradamente en el tiempo (“Time Lapse”), ayudará a mejorar la interpretación entre señal y ruido, observando los cambios que pueden producir en profundidad los vertidos de soluciones acuosas en el muro, es decir, infiltraciones, nivel freático y saturación provocada por las lluvias en invierno. Los resultados del time lapse pueden verse en la sección 4.5.

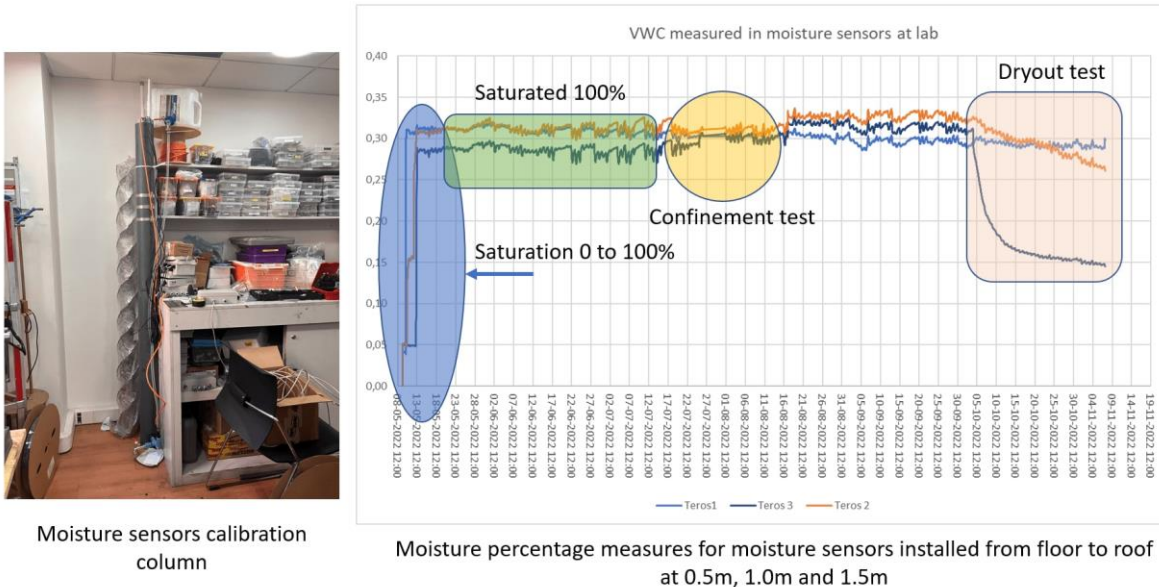
Como se ha mencionado, los perfiles ERT se realizaron utilizando un IRIS Syscal 48ch y también la instalación permanente del sistema MOR-ERT Geosinergia [3][4]. El equipo ERT se instaló para tener una resolución mínima de 2,5x2,5 metros en 240 metros de longitud, por lo que la distribución de electrodos fue cada 5 metros y se configuró un arreglo dipolo-dipolo. Esto lleva a calcular una profundidad en torno a los 40 metros como máximo [9]. Los resultados de esta adquisición son detallados en la sección 4.3.



**FIGURA 11. FOTOS DE LA INSTALACIÓN DE LOS PERFILES ERT 2D SOBRE EL TALUD DEL MURO DEL TRANQUE DE RELAVES.**

### 3.5 EXPERIMENTACIÓN SENSORES DE HUMEDAD DE ALTA FRECUENCIA EN LABORATORIO

Los sensores de humedad han sido sometidos a pruebas en un laboratorio para probar la respuesta del sensor con el mismo material de relaves confinado en un cilindro de PVC. Pasando por 3 etapas de humectación: seco, húmedo y luego seco nuevamente, y adicionalmente 1 prueba de compactación o presión superior (“confinement test”).



**FIGURA 12. PRUEBA DE SENSORES DE HUMEDAD EN LABORATORIO, FOTOGRAFÍA DE LA COLUMNA DE RELAVE DENTRO DE PVC GRIS Y GRÁFICA DE RESULTADOS DE % DE HUMEDAD, CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA EN EL MATERIAL EN VALORES 0 A 1 EN EL EJE Y, Y FECHA DE TOMA DE DATOS EN EL EJE X.**

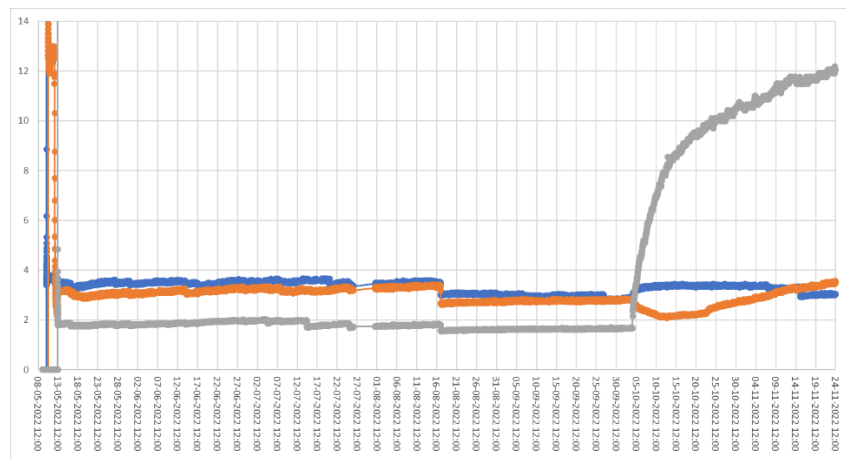
Los pasos de este experimento realizado se describen a continuación:

Se instaló en el laboratorio de Geosinería Santiago, una columna de prueba con 3 sensores de humedad modelo TEROS12 dentro del tubo de PVC gris de 2.0m de altura. Los resultados de estos sensores están graficados en la Figura 12 con el primer sensor a 0.5m del suelo y representado por la línea celeste, luego a 1.0m (línea naranja) y 1.5m (línea azul). Y este tubo ha sido rellenado con relave del muro del tranque (desde el suelo hasta el final del tubo en 2.0 metros de altura).

El proceso de saturación fue ingresar agua por la parte inferior del tubo hasta llegar a la saturación visible en superficie a 2 metro de altura, donde una película de agua quedaba visible por sobre el nivel de arena de relave superior.

Y se registró la adquisición de los sensores de humedad desde su estado seco lleno de arenas de relave, pasando por el vertido de agua hasta la saturación visible del tubo.

Así mismo, podemos presentar la gráfica de resistividades medidas por los sensores de humedad en la columna construida (Figura 13), donde se observa que al saturar la columna con agua, los valores de resistividad bajan a valores entre 2 y 4 Ohm\*m, luego teniendo una variación casi nula cuando se agrega presión en la superficie, pero cuando se elimina esa presión las resistividades bajan (como se ve entre el 16 de Agosto y 30 de Septiembre), para finalmente aumentar cuando se extrae el agua de la columna para secarla, aumentando drásticamente la resistividad al sensor que se encontraba más cerca de la superficie (línea gris para el sensor a 1.5m de columna, línea naranja para el sensor a 1m de columna y línea azul para el sensor a 0.5m de columna).



**FIGURA 13. PRUEBA DE SENSORES DE HUMEDAD EN LABORATORIO, GRÁFICA DE RESULTADOS DE RESISTIVIDAD EN LOS 3 SENSORES, RESISTIVIDAD EN OHM\*M EN EL EJE Y, Y FECHA DE TOMA DE DATOS EN EL EJE X.**

Revisando los resultados, se puede ver en la Figura 12, que a medida que se va humectando el contenido del tubo con agua, el porcentaje de humectación va aumentando en los 3 sensores instalados, pasando de 0 a 30% aproximadamente. Al mismo tiempo, la resistividad observada en la Figura 13 por los sensores TERSO12 va disminuyendo, pasando de un valor alto a bajo 4 ohm\*m. Cuando el agua se observa en la superficie de 2 metros, suponemos un material saturado, por lo que se detiene el llenado, y las curvas (Figura 12 y Figura 13) muestran un porcentaje de saturación y una resistividad aproximadamente constantes. Cuando se aplica una presión en la superficie del material, no existe un cambio muy notorio, pero cuando se libera esa presión, si se puede observar que aumenta el porcentaje de saturación y disminuye la resistividad en los 3 sensores.

Finalmente, cuando se abre la válvula para desaguar la columna, aumenta significativamente la resistividad del sensor más próximo a la superficie, y disminuye notoriamente su porcentaje de saturación, ya que se seca. En cambio, por un periodo corto de tiempo esta baja en la cantidad de agua para el sensor mas cercano a la superficie se traduce en menor peso suprayacente para los sensores a mayores profundidades, por lo que el sensor a 1m detecta una bajada en la resistividad antes de quedar no saturado y comenzar el alza. El grado de saturación no es afectado por esta leve baja en la presión suprayacente.

### 3.6 EXPERIMENTACIÓN ELECTRODOS CON DIFERENTES TAZAS

Los electrodos de estaca inoxidable han sido sometidos a pruebas en un terreno accesible, donde se han generado tazas con diferente dopado, agua, agua con bentonita sódica, estaca con virutilla de acero, agua con hidrogel, y estaca sola. El objetivo es observar la perdida de contacto con el suelo circundante en el tiempo, o así mismo, el aumento de resistencia entre estacas.

Para concretar esta prueba ha sido realizado un perfil ERT de 28 canales cada 1 metro de distancia, con tazas construidas con una ahoyadora como se observa a continuación en la Figura 14.



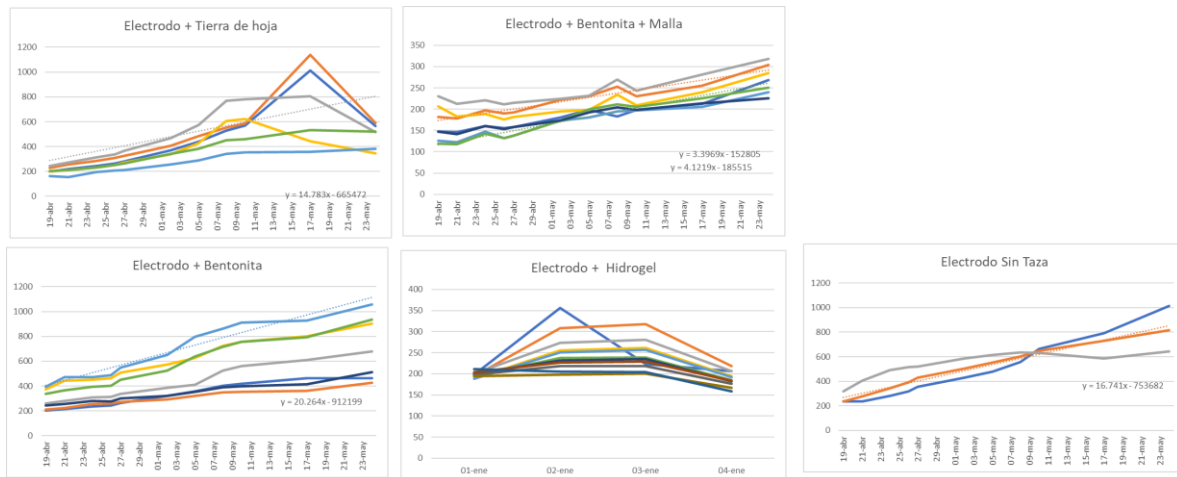
**FIGURA 14. PERFIL DE PRUEBA DE ELECTRODOS. TAZAS REALIZADAS CON AHOYADORA.**



El listado de dopados en cada taza se puede ver en la siguiente tabla.

Electrodo estaca inox +	Electrodo A	Electrodo B		
tierra de hoja	1	2	natural&bentonita&malla	14
tierra de hoja	2	3	natural&bentonita&malla	15
tierra de hoja	3	4	natural&bentonita&malla	16
tierra de hoja	4	5	natural&bentonita&malla	17
tierra de hoja	5	6	natural&bentonita&malla	18
tierra de hoja	6	7	natural&bentonita&malla	19
natural&bentonita	7	8	natural&bentonita&malla	20
natural&bentonita	8	9	natural&hidrogel	21
natural&bentonita	9	10	natural&hidrogel	22
natural&bentonita	10	11	natural&hidrogel	23
natural&bentonita	11	12	natural&hidrogel	24
natural&bentonita	12	13	natural sin taza	25
natural&bentonita	13	14	natural sin taza	26
			natural sin taza	27
			natural sin taza	28

Los resultados durante 2 meses de adquisición de la resistencia de contacto entre cada electrodo, revela que las tazas con bentonita, especialmente la bentonita con malla mantiene una lenta alza en la resistencia siendo más adecuadas que la tierra de hoja o natural sin taza para largos períodos de ensayo (Figura 15)



**FIGURA 15. RESULTADOS DE RESISTENCIA DE CONTACTO ENTRE ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE CON TAZAS DE DISTINTO DOPADO.**

Durante las pruebas, existen lluvias en la zona desde principios de mayo, las que son observadas especialmente por materiales absorbentes, como la tierra de hoja y los electrodos sin taza.

Los electrodos con hidrogel presentan una resistencia que se vuelve más conductiva en el tiempo, lo que es de esperar para materiales capacitivos, donde puede existir una cargabilidad debido a la misma realización de perfiles ERT polarizando el terreno. Esto no es recomendable porque induce a error en los resultados de una tomografía.

Sin embargo, luego de 2 meses de ensayo, pese a que los electrodos con taza de bentonita presentan un contacto aceptable, los electrodos sin taza son hidratados por las lluvias y mantienen aún un contacto similar.

Por lo tanto, en nuestro caso, si no es posible realizar una taza con bentonita, o bentonita y malla, debido a que no se puede introducir otros materiales a un muro de tranque de relaves, es una buena práctica realizar una taza con agua o agua y sal, la que se observa en la prueba anterior con las estacas sin taza que son hidratadas por las lluvias. Por lo que se recomienda una humectación natural cada 1 o 2 meses es suficiente para mantener un buen contacto con el suelo en superficie.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de la adquisición realizada en el tranque de relave para la técnica de tomografía eléctrica ERT y los datos registrados por los sensores de humedad en pozos aledaños. Adicionalmente, se muestra el procedimiento de prueba realizado en laboratorio con las muestras superficiales del tranque.

### 4.2 MODELO DE SENSIBILIDAD

La sensibilidad observada en los perfiles, como hemos mencionado en la sección 2.2, indica si la estimación de un valor afecta el modelo fuerte o si el valor se puede cambiar, sin afectar la respuesta del modelo.

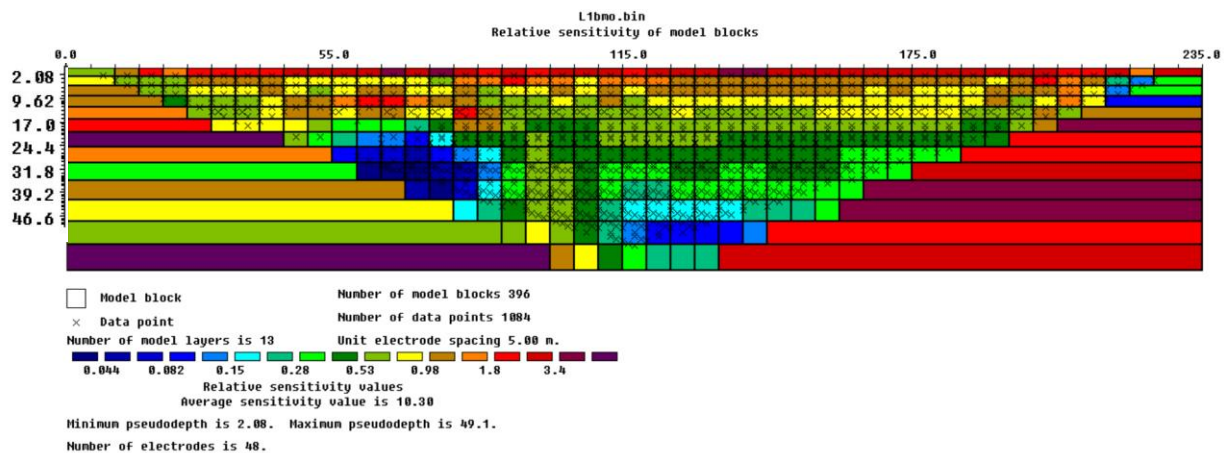
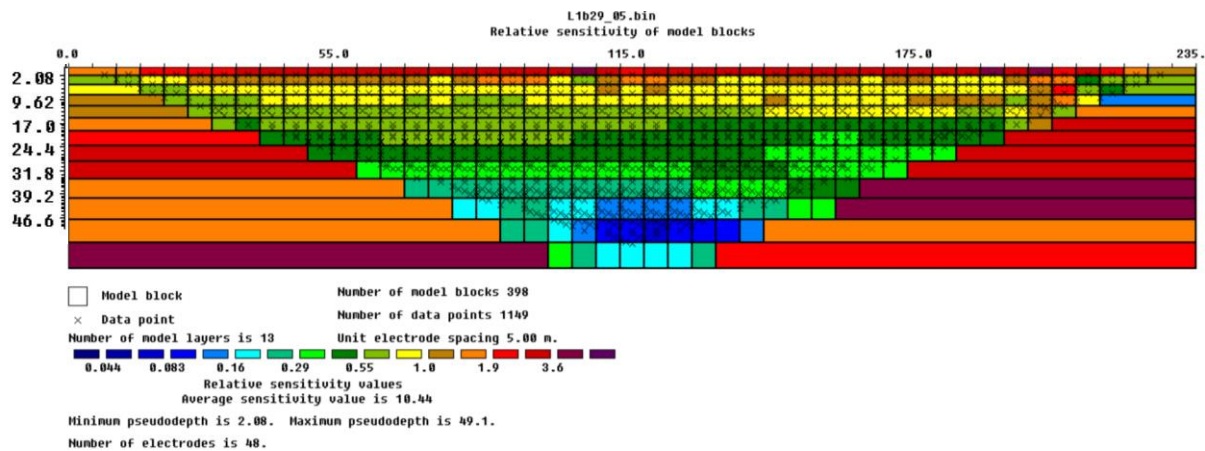


FIGURA 16. *MODELO DE SENSIBILIDAD OBTENIDO PARA EL PERFIL 1B.*

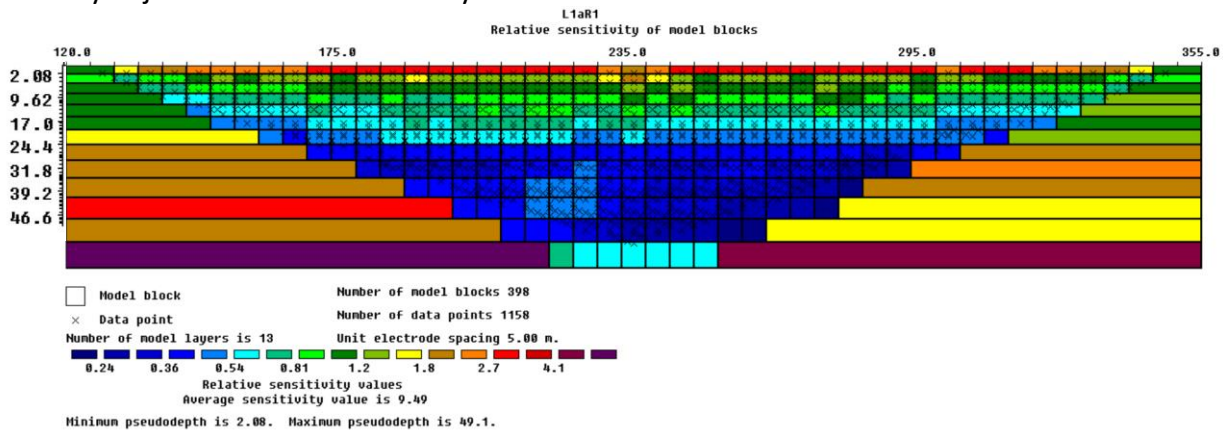
Como se muestra en la Figura 16, la sensibilidad obtenida en el perfil 1b es muy baja hacia las zonas azules, y mantiene una variación de entre 0.3 a 1 en el resto del perfil. Esto significa que, en su mayoría, para el perfil 1b el modelo es sensible a los cambios resistivos.

La sensibilidad del perfil 1b cambia luego de las primeras lluvias, eliminando la baja sensibilidad presentada en la zona azul concentrada a una media profundidad entre los 55 y 85 metros de línea, como muestra la Figura 17.



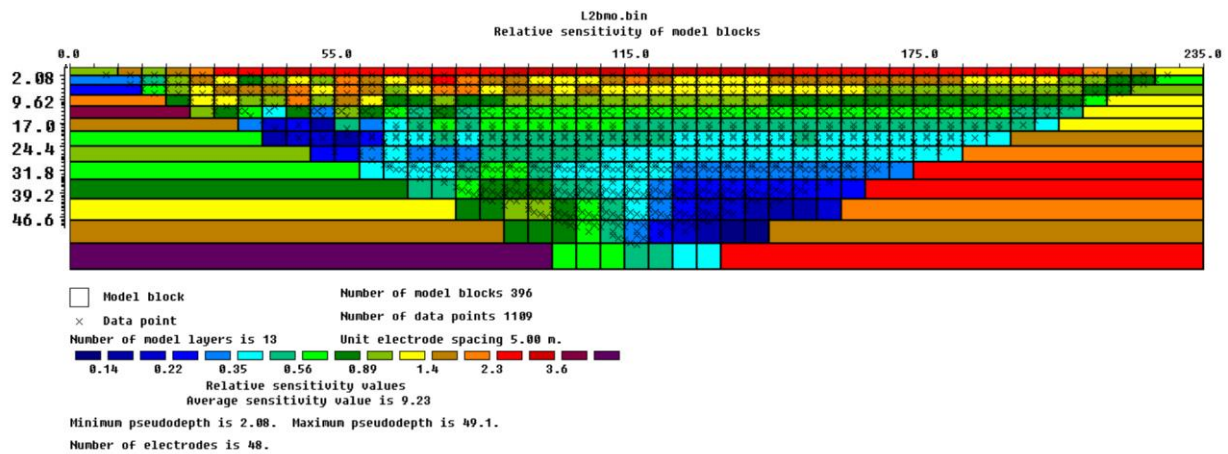
**FIGURA 17. MODELO DE SENSIBILIDAD OBTENIDO PARA EL PERFIL 1B DESPUÉS DE LAS LLUVIAS.**

Por otro lado, el Perfil 1a, adquirido en un día seco y sin humectación en superficie, se refleja en que el modelo no es muy sensible a los cambios resistivos, por lo que debemos descartar su uso para observar las resistividades en profundidad y cotejarlo con los otros perfiles. En la Figura 18 podemos ver el perfil 1a con su primer roll along, donde toda la imagen tiene muy baja sensibilidad entre 0.1 y 0.2.



**FIGURA 18. MODELO DE SENSIBILIDAD OBTENIDO PARA EL PERFIL 1A.**

Finalmente, en la Figura 19, para el Perfil 2b se puede ver una variación de la sensibilidad entre 0.2 y 1 a lo largo de la mayor parte del perfil, observando una sensibilidad baja hacia las zonas azules, lo que demuestra que existe sensibilidad del modelo a los cambios resistivos.



**FIGURA 19. MODELO DE SENSIBILIDAD OBTENIDO PARA EL PERFIL 2B.**

El perfil 1b es el que presenta mayor sensibilidad, por lo que fue elegido para realizar pruebas durante varios meses (Time Lapse y repeticiones antes y después de las lluvias). Además, este perfil cruza el pozo n2 donde se instalaron los sensores de humedad para correlacionar resistividad y grado de saturación. **Por lo que en esta tesis, se continuará la discusión respecto de este perfil en particular.**

### 4.3 RESULTADOS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA (ERT)

Los resultados de resistividad de la adquisición de ERT en la línea 1a, 1b y 2b muestran 3 capas principales en profundidad (ver Figura 20 con el perfil ERT 2D invertido de la línea 1b en el software RES2DINV): alta resistividad cerca de la superficie (0 a 5 metros profundidad con resistividad entre 135 a 300 Ohms\*m), seguida de una capa de resistividad media, entre 5 a 25 metros con resistividad entre 45 a 100 Ohms\*m, y la otra inferior a 25 metros de profundidad con resistividad entre 135 a más de 300 Ohms \*metro. En esta figura, se observan los resultados de resistividad del Perfil 1b adquiridos en dos fechas distintas. El perfil del 29 de Mayo fue adquirido después de las primeras lluvias, observándose cambios resistivos respecto del perfil adquirido el 27 de Abril. El único factor de cambio entre ambas lecturas fueron las lluvias, por lo que se puede atribuir a un mejor contacto con los electrodos en superficie gracias a la humectación recibida por las lluvias, lo que aumenta la sensibilidad en profundidad, y también los cambios resistivos de la capa 2 (entre 5 y 25 metros) debido a estas lluvias.

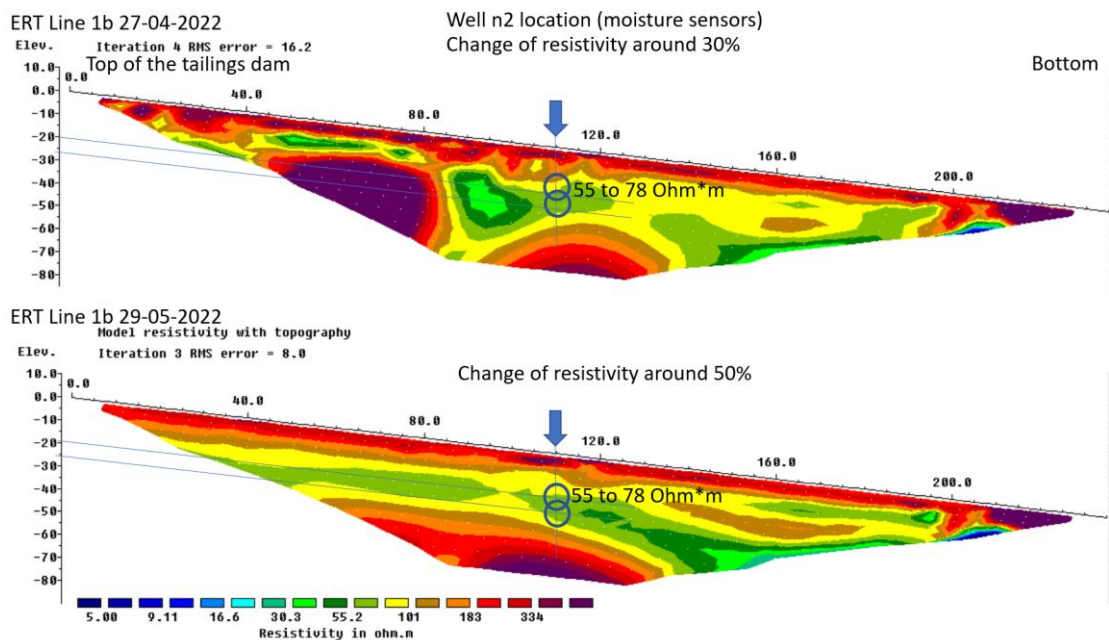


FIGURA 20. ERT 2D PERFIL 1B ADQUIRIDO EN ABRIL Y MAYO DE 2022.

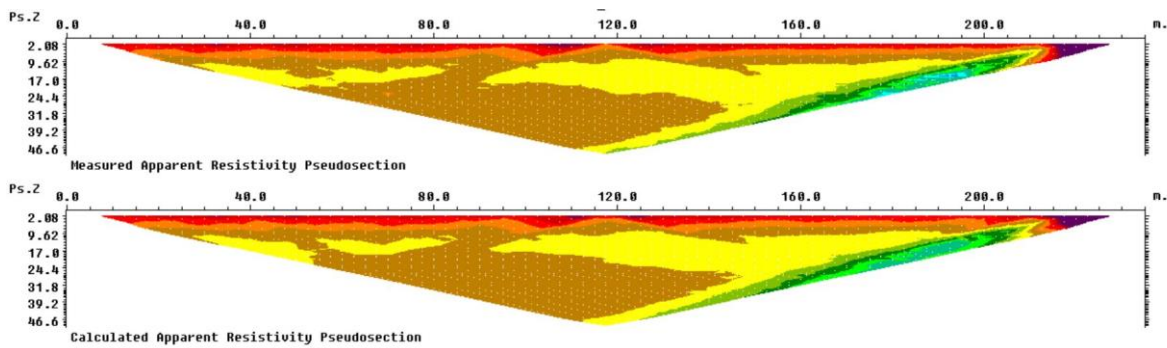


FIGURA 21. PSEUDOSECCIONES ERT 1B PERFIL 29-05-2022.

En la Figura 21 se presentan las pseudosecciones del modelo y la resistividad aparente. La diferencia entre ellos se representa en el error rms del 8% indicado en la Línea ERT del 29-05-2022, que debemos tener en cuenta cuando inferimos la relación con las medidas de resistividad de los sensores de humedad.

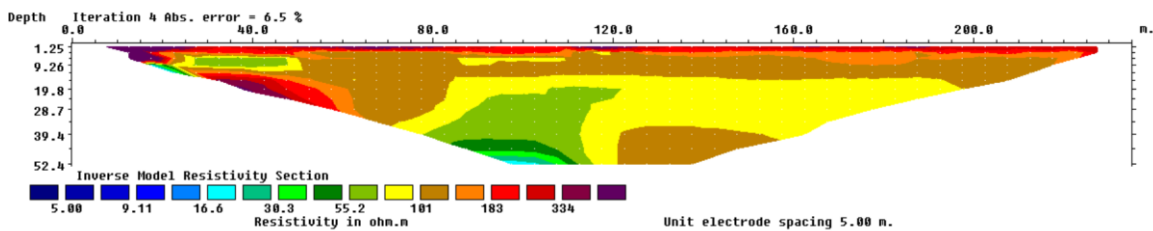


FIGURA 22. ERT 2D PERFIL 2B.

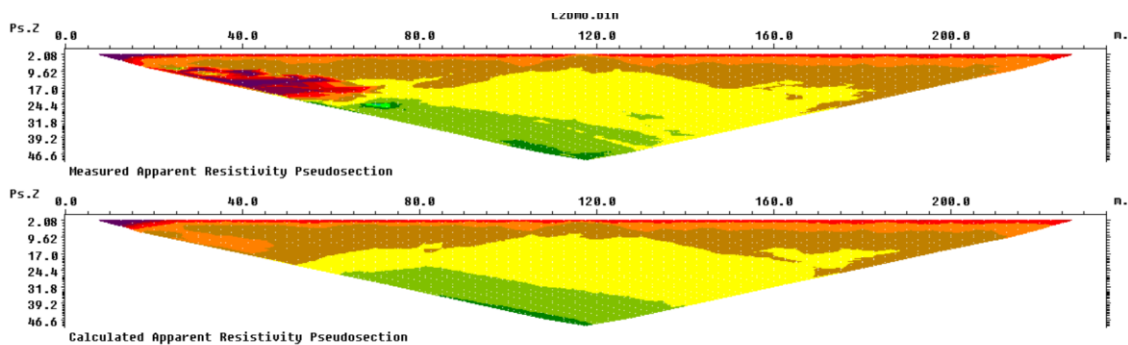


FIGURA 23. PSEUDOSECCIONES ERT 2B.

En la Figura 22 y Figura 23 se presentan los resultados del Perfil 2b, donde se observan 3 facies con resistividades similares a las del Perfil 1b.

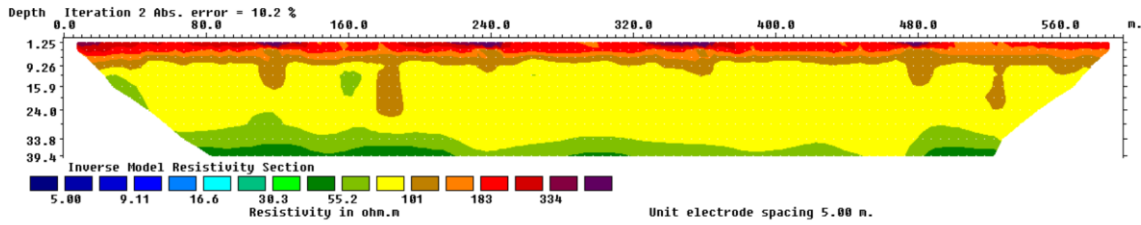


FIGURA 24. ERT 2D PERFIL 1A.

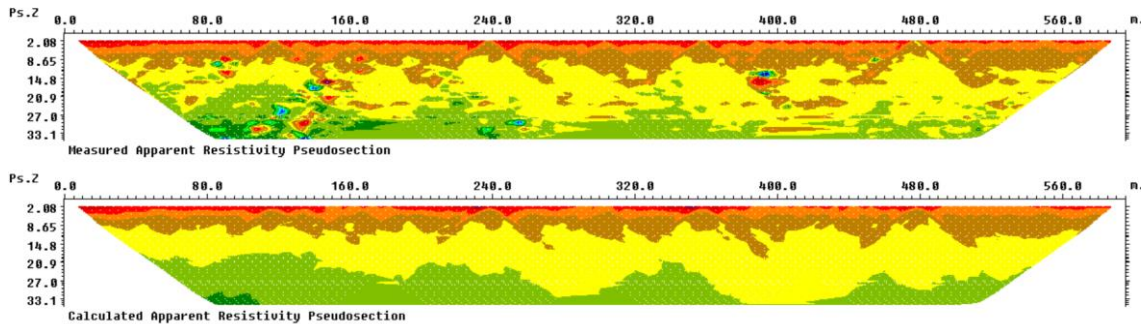


FIGURA 25. PSEUDOSECCIONES ERT 1A.

En la Figura 24 y Figura 25 se presentan los resultados del Perfil 1a, que habíamos identificado de muy baja sensibilidad, lo que puede también intuirse por la homogeneidad en profundidad, sin identificación de los estratos de intermedios detectados por los perfiles 1b y 2b.

Los resultados, especialmente del Perfil 1b, tiene una correlación con el estudio de muestra central realizado en la presa en 2019 (Figura 26). Donde la composición detectada para los primeros 5 metros fue en su mayoría grava, arena arcillosa y arena limosa, luego de 5 a 25 metros mezclas de arena y por más de 25 metros una composición más dura de mezclas de limo. Estudios anteriores han mencionado los rangos de valores de resistividad para materiales de relaves [10][12], por lo que podemos comparar estos rangos para correlacionar el estudio de la muestra central con los perfiles ERT. Debido a que esta presa de relaves no está en uso desde hace un par de años, asumiríamos una alta resistividad para el limo arcilloso seco (más de 100 Ohm\*m), luego el material de relaves (mezclas de arena entre 20 y 100 Ohm\*m) y finalmente una mezcla de limo compactada debajo (más de 100 Ohm\*m).



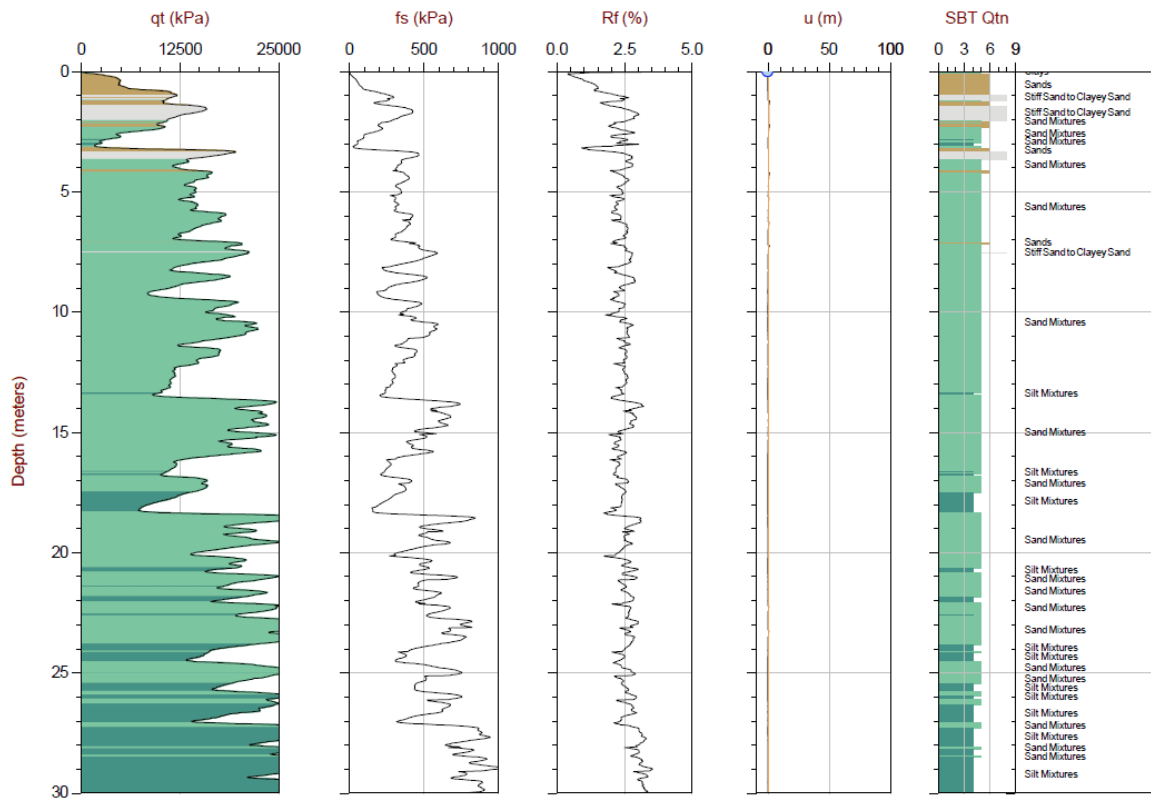


FIGURA 26. ESTUDIOS HISTÓRICOS CON MUESTRAS DE TESTIGOS EN EL MISMO TRANQUE DE RELAVES, 2019.

#### 4.4 RESULTADOS DE SENSORES DE HUMEDAD DE ALTA FRECUENCIA

Ahora, para los sensores de humedad instalados en el pozo n 2, utilizando la relación entre CE y resistividad aparente presentada en la Metodología de esta investigación, los resultados se muestran en la Figura 27.

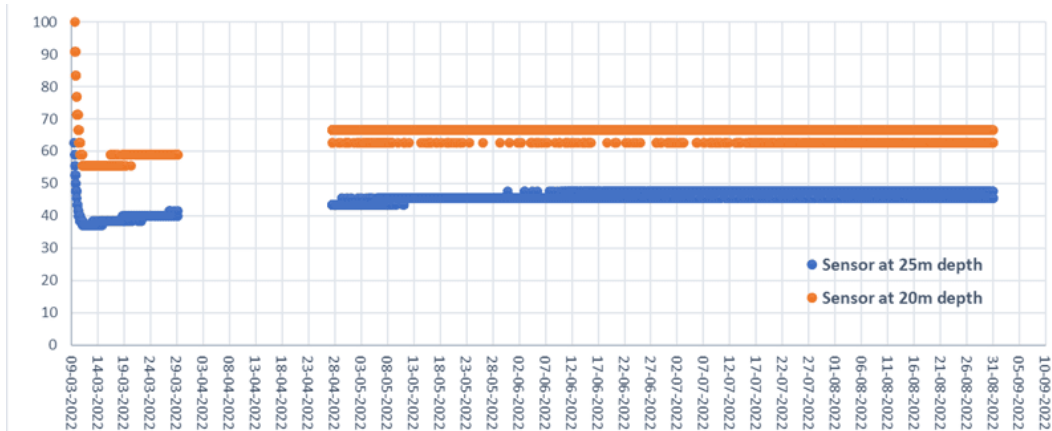


FIGURA 27. MEDICIONES DE RESISTIVIDAD POR SENSORES DE HUMEDAD EN EL POZO N 2 ENTRE MARZO Y AGOSTO DE 2022.

Además, los sensores de humedad entregan el VWC o Volume Water Content, que es la característica principal de los sensores de humedad y el paso para correlacionar la resistividad aparente y el grado de saturación para el mismo período de tiempo y posición. Los resultados se muestran en la Figura 28 utilizando el 32% de la porosidad total.

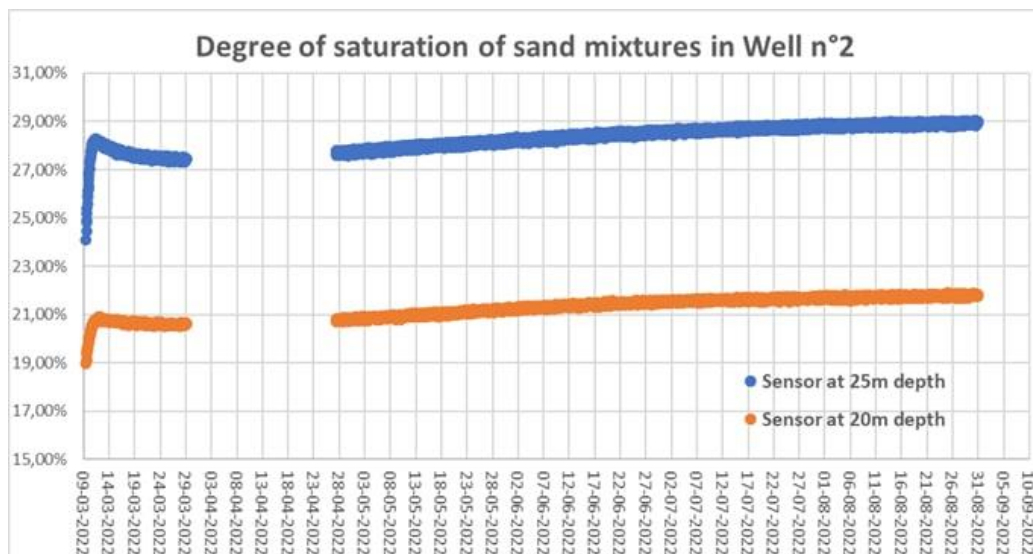


FIGURA 28. GRADO DE SATURACIÓN DE LAS MEDICIONES DE LOS SENSORES DE HUMEDAD EN EL POZO N 2 ENTRE MARZO Y AGOSTO DE 2022.

## 4.5 RESULTADOS DE TIME LAPSE ERT

Se ha tomado la línea 1b para realizar un time lapse entre los meses de mayo y agosto 2022.

Donde las lluvias durante el invierno han mejorado la conducción de los electrodos en superficie y también han mostrado que la resistividad varía en la segunda capa, bajo los 5 metros de profundidad. A continuación, se muestran los resultados obtenidos a lo largo del tiempo de medición (Figura 29).

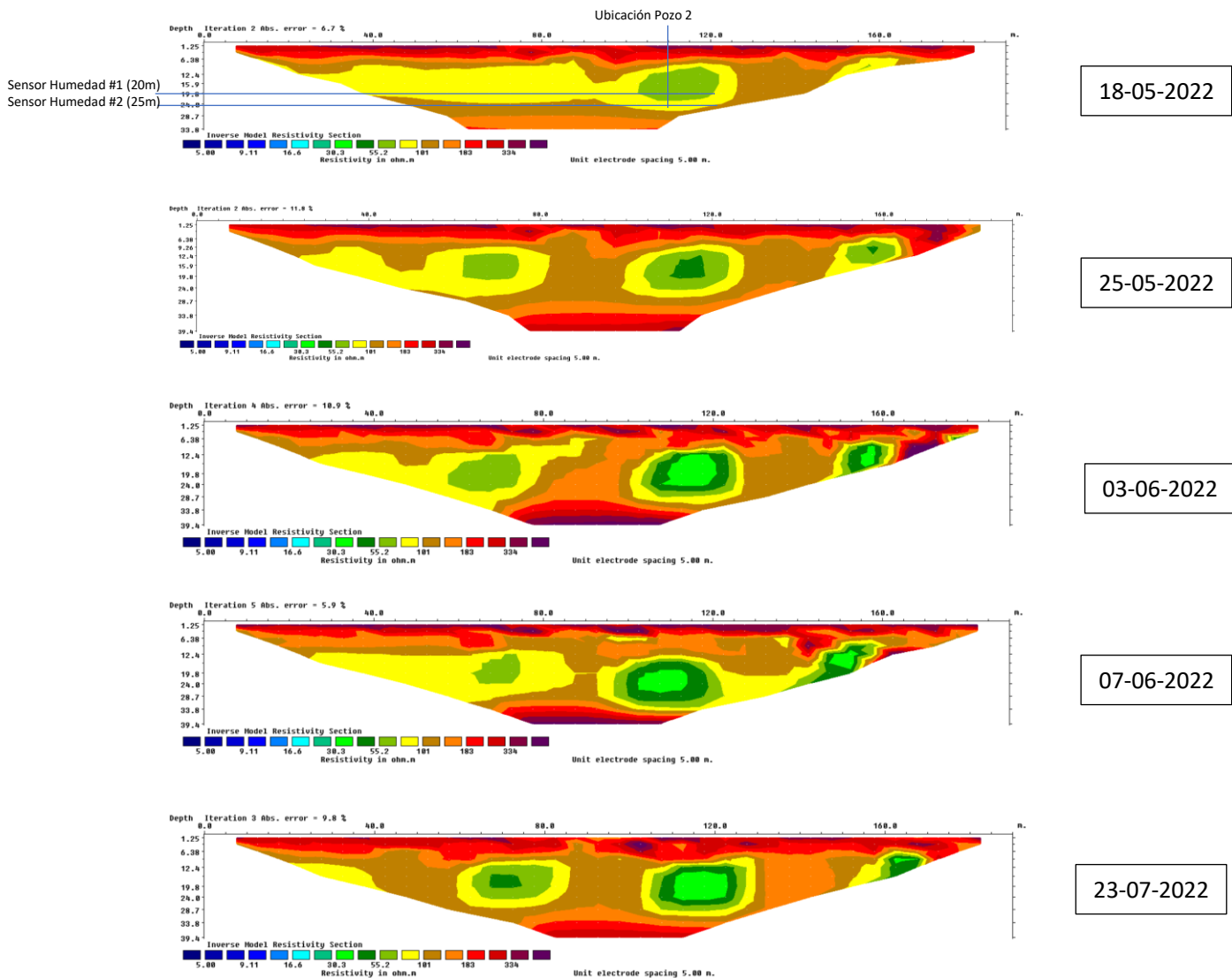


FIGURA 29. ERT 2D PERFIL 1B TIME LAPSE.

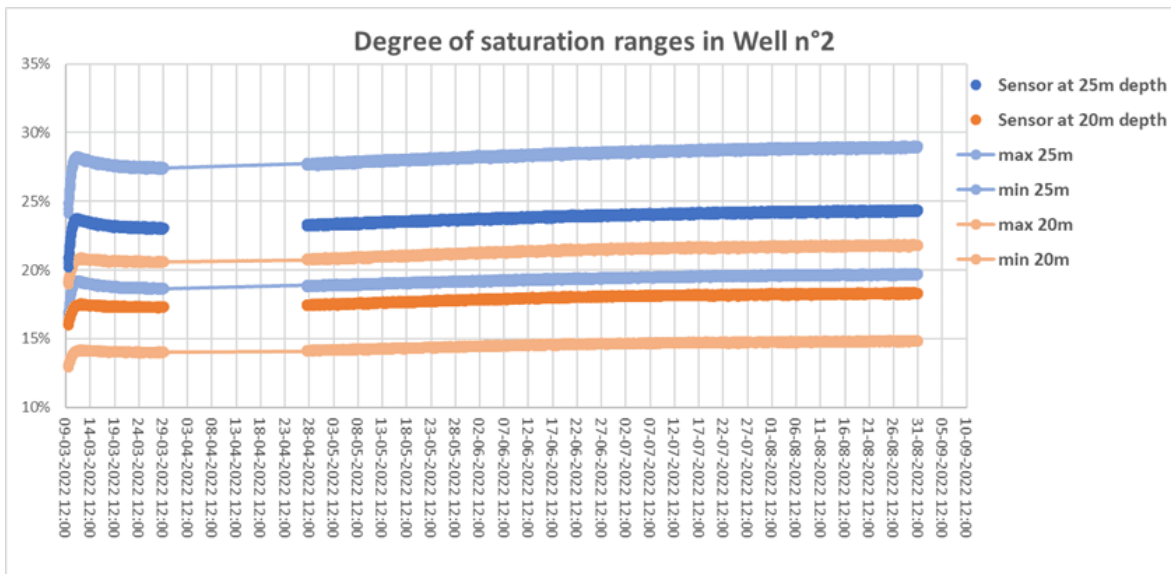
Los resultados del time lapse muestran que existe diferencias entre las resistividades observadas en el lugar del pozo a través de los meses de invierno (Figura 29), sin embargo, los resultados de los sensores de humedad muestran que el porcentaje de humedad se mantiene a esas profundidades (Figura 28), lo que por consecuencia demuestra que existe una variación de la resistividad leída por el equipo de tomografía pero no leída por los sensores de humedad a la misma profundidad a través del tiempo, lo que puede deberse al aumento y disminución de la presión por capas suprayacentes entre lluvias, además de las variaciones de la sensibilidad por el contacto con los electrodos en superficie al secarse el terreno luego de las lluvias.

#### **4.6 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

Comparando los valores de resistividad obtenidos de los sensores de humedad en el pozo 2 y los perfiles de tomografía de resistividad eléctrica (ver Figura 20 y Figura 27), podemos ver que coincide la dirección de cambio de resistividades en ERT que muestra baja resistividad a mayor profundidad entre los 20 y 25 metros. El cambio de magnitud de 65 a 45 ohm\*m en sensores de humedad y de 78 a 55 ohm\*m en la tomografía ERT, representa aproximadamente un 30 % de disminución de la resistividad en las observaciones de ambos instrumentos en esa área en particular.

Una de las limitaciones de la metodología usada, es el aumento de la presión del material más profundo soportado por el peso del material superior o de capas suprayacentes en el muro del tranque. Para incluir en nuestra metodología el efecto de este confinamiento y definir un mínimo en el cambio real del grado de saturación, podemos pensar que la porosidad total es menor para objetivos más profundos [19], por lo que el grado de humectación cambiará al disminuir la porosidad para un mismo valor de VWC medido por el instrumento (sensor de humedad TEROS12 sección 3.3).

Entonces, siguiendo como se describe en la Metodología sección 3.3, si tomamos que existe un cambio en la porosidad promedio de los materiales estudiados de 47% a 32% cuando hay mayor peso en las capas suprayacentes, se puede definir un rango de grado máximo y mínimo de saturación alrededor de los valores medidos por los sensores en el pozo 2 (Figura 30).



**FIGURA 30. RANGOS DE GRADO DE SATURACIÓN PARA LAS MEDICIONES DEL SENSOR DE HUMEDAD CON RESPECTO A LOS CAMBIOS EN LA POROSIDAD TOTAL.**

Vemos en la Figura 30 que el sensor de humedad a 20 metros puede cambiar el grado de saturación de 15% a 22% debido a la presión sobre el volumen de poro, pero si seguimos el mismo argumento, el sensor de humedad a 25 metros tendrá un grado de saturación entre 20% y 29%. A través del tiempo, un promedio de estos cambios podría estar relacionado con el grado de saturación, lo que en este caso sería entre:  $25\% - 18\% = 7\%$ .

Entonces, el grado de saturación medido de la porosidad promedio da una diferencia de 7% entre los 20 y 25m de profundidad en el pozo 2, lo que es representado por una baja de resistividad del 30% o aproximadamente  $20 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ .

#### 4.7 DISCUSIÓN

Esta tesis plantea que el uso de sensores de humedad de alta frecuencia como una medida de mayor precisión que se mide de forma directa (similar a un multímetro), que es la medida que faltaba para realizar una interpretación de la humedad de los resultados de una tomografía eléctrica de forma insitu en el muro del tanque, sin tener que pasar por laboratorio para estimar las constantes a utilizar de la Ley empírica de Archie necesariamente.

Los sensores de humedad funcionan como una medida directa de la resistividad insitu localizados en un pozo, como se explica en el capítulo 3 de esta tesis, además de medir directamente el volumen de agua contenido (VWC) alrededor del sensor mediante

cargabilidad del medio. Es más, este sensor al ser instalado en profundidad está considerando el efecto de la presión ejercida por el medio circundante.

A continuación, se describen los pasos realizados para comprobar la metodología empírica que busca definir esta tesis utilizando los resultados de los sensores de humedad para pasar los resultados de resistividad obtenidos por la tomografía eléctrica a porcentaje de saturación.

1. Como fue presentado en este Capítulo 4, el gradiente de cambio de resistividades concuerda en los puntos medidos de ambas técnicas, donde existe una semejanza entre los datos de resistividad medidos por un método indirecto de alta incertidumbre en un muro de relave (como lo es el ERT), y un transductor electrónico de resistividad (sensor de humedad TEROS12). Este sensor tiene una medida directa y más precisa de resistividad, la que fue probada de forma práctica según la comparación realizada midiendo resistencias/semiconductores contra un multitester y en una columna de prueba en laboratorio.

En los dos puntos que se encuentran instalados los sensores de humedad TEROS12 en el pozo 2 del muro del tranque de relaves, se han adquirido las medidas de conductividad (EC). También, la tomografía eléctrica (ERT) del perfil 1B ha medido indirectamente la resistividad en ese mismo punto con las siguientes diferencias, donde vemos que la diferencia o relación entre lo medido por el sensor de conductividad y la ERT, se puede asumir como una constante de proporcionalidad.

		Relación:
ERT (y)	TEROS 12 (x)	$y=k x$
78	65	1.20
55	45	1.22

**FIGURA 31. RELACIÓN ENTRE RESISTIVIDADES MEDIDAS POR AMBOS INSTRUMENTOS (ERT, SENSOR DE HUEMDAD).**

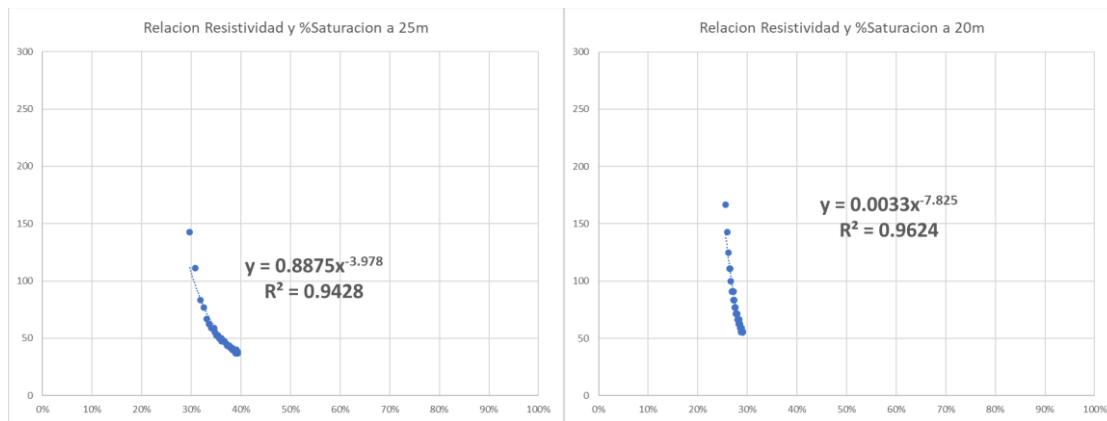
2. Por otro lado, este sensor de humedad realiza una segunda medición directa, que corresponde a la medida de volumen de agua contenido (VWC, que se traduce al %deSaturación o “Sr” como VWC dividido por la Porosidad Total), la que fue probada de forma práctica vertiendo agua en una columna de arena en laboratorio (sección 3.4-3.5), que contiene a lo largo 3 sensores de humedad TEROS12, de esa manera sabemos que cuando vertimos agua por arriba y comenzamos a humectar la columna, el sensor detecta aumento de volumen de agua contenido. Se asume que este sensor es preciso, ya que también corresponde a un transductor electrónico.

La precisión de este sensor TEROS12 es mostrada en su ficha técnica, donde dice que tiene un error instrumental de  $\pm 3\%$  para EC, y de  $\pm 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$  para VWC.

3. Sabiendo que la medida de resistividad del sensor de humedad es directa y precisa, igual que el multitester, y asumiendo que la medida de volumen de agua contenido es precisa ya que también es un transductor electrónico (y habiendo hecho la prueba en laboratorio), podemos ir al siguiente paso de poner los sensores en un pozo en el muro de un tranque de relave, y utilizar el sensor de humedad como medida directa.

En este paso, ocupamos los datos adquiridos de saturación del medio ( $S_r$ ) con los sensores instalados en el pozo para calcular los parámetros de la ley empírica de archie.

Datos adquiridos:



**FIGURA 32. DATOS ADQUIRIDOS POR LOS SENSORES DE HUMEDAD TEROS 12 EN POZO2. EJE X MUESTRA EL PORCENTAJE DE SATURACIÓN Y EL EJE Y LA RESISTIVIDAD MEDIDA.**

En la figura anterior, el eje y representa las medidas de resistividad ( $\text{Ohm}\cdot\text{m}$ ) obtenidas con el instrumento TEROS 12, y el eje x, las medidas de VWC crudas, dividida por la porosidad total calculada en la sección 3.3.

La ley empírica de Archie [49] dice:

$$\rho = (\alpha \rho_w n^{-m}) S_r^{-p}$$

Donde

$\rho$  es la resistividad real del medio

$\alpha$  parámetro del suelo

$\rho_w$  resistividad de la solución contenida

$n, m$  porosidad y el índice  $m$  (factor de cementación)

$S_r, p$  % de saturación y el índice  $p$  (coeficiente de saturación)

Ahora respecto del dato adquirido VWC y el porcentaje de saturación ( $S_r$ ), la fórmula quedaría:

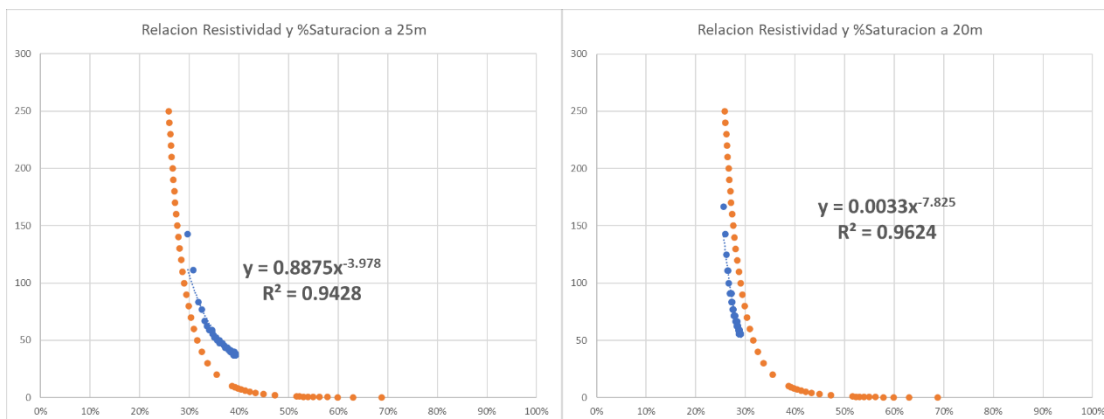
$$\rho = k S_r^{-p} = K \cdot VWC^{-p}$$

Donde

$$\text{Porosidad Total} = \phi = \frac{\rho_b}{\rho_s} = \frac{\text{densidad del suelo}}{\text{densidad de los minerales}}$$

$$S_r = \frac{VWC}{\phi}$$

Viendo las curvas adquiridas por el sensor podemos aproximar las constantes de la fórmula anterior, las que están graficadas en la siguiente figura en color naranja.



**FIGURA 33. DATOS MODELADOS MEDIANTE LEY EMPÍRICA DE ARCHIE (CURVA EN NARANJO), Y DATOS ADQUIRIDOS POR LOS SENSORES DE HUMEDAD TEROS 12 EN POZO 2 (CURVA EN AZUL). EJE X MUESTRA EL PORCENTAJE DE SATURACIÓN Y EL EJE Y LA RESISTIVIDAD MEDIDA.**

Las constantes aproximadas (de la gráfica en color naranja), que definen la conversión entre resistividad y porcentaje de saturación a ocupar en esta ocasión son:

$$\rho = k S_r^{-p} = 0.005 S_r^{-8}$$

Con estas constantes podemos pasar los datos de resistividad a VWC, o también, el porcentaje de saturación (conociendo la porosidad total).



$$S_r = \left(\frac{\rho}{k}\right)^{-\frac{1}{p}} = \left(\frac{\rho}{0.005}\right)^{-\frac{1}{8}}$$

En resumen, sobre los sensores de humedad en pozos del área de estudio, estos ayudan a generar las curvas resultantes de (% de Saturación vs Resistividad) de la Ley empírica de Archie sin tener que ir a laboratorio, ya que se midió las resistividades de la muestra y el volumen de agua de la muestra insitu en el pozo mismo.

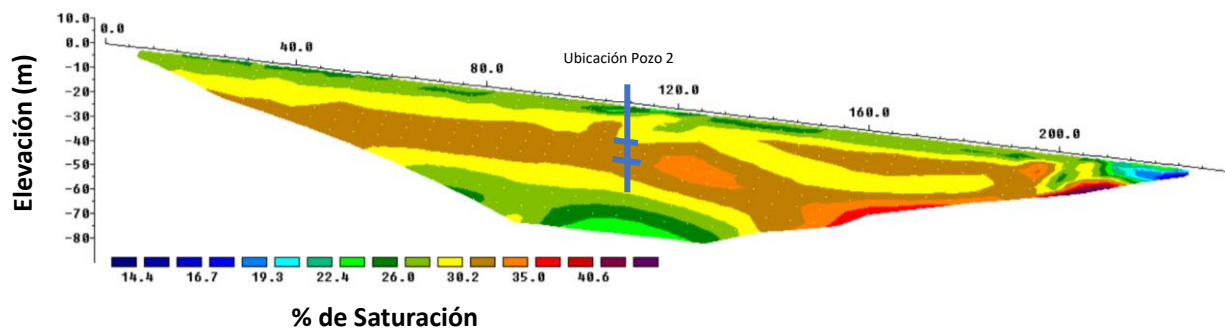
Aunque la precisión del modelamiento realizado (curva resultante de la Ley empírica de Archie) es bajo en este ejemplo, se puede afinar mediante el aumento de puntos de medición en terreno, es decir, mayor cantidad de sensores de humedad en pozos, que muestren en sus datos el aumento de saturación durante un tiempo.

4. Habiendo realizado perfiles de ERT en el muro de un tranque de relaves (donde sus resultados son mostrados en la sección 4.3), procedemos a utilizar los resultados de los sensores de humedad y la Ley empírica de Archie obtenida en el punto anterior, para pasar estos perfiles a % de Saturación. Para esto debemos considerar además de la formula resultante en el punto anterior, la proporcionalidad encontrada entre la resistividad medida por los sensores de humedad y ERT en el punto 2.

$$\rho_{ERT} = k \rho = 1.2 \rho$$

$$S_r = \left(\frac{\rho}{0.005}\right)^{-\frac{1}{8}} = \left(\frac{\rho_{ERT}}{1.2 \cdot 0.005}\right)^{-\frac{1}{8}}$$

Como ejemplo en esta tesis, pasamos el perfil 1B de ERT (mostrado en la Figura 20) a % de Saturación en la siguiente figura.



**FIGURA 34. PERFIL 1B CONVERTIDO A % DE SATURACIÓN DE AGUA. EN LÍNEA AZUL LA UBICACIÓN DEL POZO2 Y LOS SENSORES DE HUMEDAD.**

## CONCLUSIONES

Se ha presentado en esta tesis un acercamiento a una nueva metodología de identificación de humedad mediante el uso de sensores de humedad del suelo instalados en pozos en el muro frontal del tranque de relaves para correlacionar el contenido de humedad en profundidad con los resultados de adquisición de ERT.

Por otro lado, las mediciones resultantes de ERT “Time Lapse” pueden indicar si las variaciones en el muro del tranque relacionadas con cambios resistivos son efectivamente filtraciones y caminos preferentes del agua que permea desde la superficie por lluvias y/o la humedad contenida en el muro.

Esta instrumentación conjunta es una alternativa práctica para la identificación de humedad en campañas mineras, especialmente para un monitoreo continuo de muros de tranque de relaves, y la posibilidad de detectar infiltración o contenido de agua en conjunto con la definición de resistividades por el ERT de manera insitu.

Luego de esta tesis, se continuarán realizando pruebas en diferentes tranques de relaves en Chile, con el objetivo de ser parte de las mejoras en el monitoreo geotécnico y detección de posibles infiltraciones en muros de tranques que están afectos a grandes catástrofes para poblaciones cercanas.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aracil Ávila, E., Maruri Brouard, U., Vallés Iriso, J., Martínez Pagán, P., & Porres Benito, J. A. (2003). Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica. En: Ingeopres. Madrid: Entorno Gráfico, 2003, vol. 122, p. 34-39. ISSN: 1136-4785
- [2] Archie, E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Amer. Inst. Min. Met. Eng., Tech. Publ. 1422. Petroleum Technology. 8 pp.
- [3] Cordova, L., Bari, J. (2021). Automated permanent monitoring of seepage for tailings dams using a customized ERT system. Tailings Gecamin 2021, 7th conference, 161-162.
- [4] Cordova, L., Comte, D., Diaz, D., & Bravo, I. (2022). ERT Methodology for identifying humidity content in tailings dams. Tailings Gecamin 2022, 8th conference, 175-181.
- [5] Camarero, P. L., Moreira, C. A., & Pereira, H. G. (2019). Analysis of the physical integrity of earth dams from electrical resistivity tomography (ERT) in Brazil. Pure and Applied Geophysics, 176(12), 5363-5375.
- [6] Cardarelli, E., Cercato, M., & De Donno, G. (2014). Characterization of an earth-filled dam through the combined use of electrical resistivity tomography, P-and SH-wave seismic tomography and surface wave data. Journal of Applied Geophysics, 106, 87-95.
- [7] Descloitres, M., Ribolzi, O., Le Troquer, Y., & Thiébaux, J. P. (2008). Study of water tension differences in heterogeneous sandy soils using surface ERT. Journal of Applied Geophysics, 64(3-4), 83-98.
- [8] Grangeia, C., Ávila, P., Matias, M., & Da Silva, E. F. (2011). Mine tailings integrated investigations: the case of Rio tailings (Panasqueira Mine, Central Portugal). Engineering Geology, 123(4), 359-372.
- [9] Loke, M. H. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to, 2, 70.
- [10] Martínez, J., Mendoza, R., Rey, J., Sandoval, S., & Hidalgo, M. C. (2021). Characterization of Tailings Dams by Electrical Geophysical Methods (ERT, IP): Federico Mine (La Carolina, Southeastern Spain). Minerals, 11(2), 145.
- [11] Newcrest Release (2019), Report on NTSF Embankment Failure, Cadia Valley Operations, for Ashurst Australia, by Independent Technical Review Board

- [12] Peixoto, A. S. P., Pregolato, M. C., Silva, A. C. C. L., Yamasaki, M. T., & Conte Junior, F. (2010). Development of an electrical resistivity measure for geotechnical and geo-environmental characterization. *Proceedings of CPT*, 10, 1-7.
- [13] Perri, M. T., Boaga, J., Bersan, S., Cassiani, G., Cola, S., Deiana, R., ... & Patti, S. (2014). River embankment characterization: the joint use of geophysical and geotechnical techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 110, 5-22.
- [14] Segura, F. R., Nunes, E. A., Paniz, F. P., Paulelli, A. C. C., Rodrigues, G. B., Braga, G. Ú. L., ... & Batista, B. L. (2016). Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environmental Pollution*, 218, 813-825.
- [15] Sjödaahl, P., Dahlin, T., & Johansson, S. (2007). Detection of internal erosion and seepage evaluation using resistivity monitoring. *WasserWirtschaft*, 97(10), 54-56.
- [16] Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water resources research*, 16(3), 574-582.
- [17] Bowker, L. N., & Chambers, D. M. (2015). The risk, public liability, & economics of tailings storage facility failures. *Earthwork Act*, 24, 1-56. (<http://www.csp2.org/tsf-failures-from-1915>)
- [18] Yibas, B., Pulles, W., Lorentz, S., & Maiyana, B. (2011). Development of water balances for operational and post-closure situations for gold mine residue deposits to be used as input to pollution prediction studies for such facilities. *Water Res. Commission Rep*, (1460/1), 11.
- [19] Zimmerman, R. W. (2017). Pore volume and porosity changes under uniaxial strain conditions. *Transport in Porous Media*, 119(2), 481-498.
- [20] Zhang, J., & Morgan, F. D. (1997, March). Joint seismic and electrical tomography. In 10th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (pp. cp-204). European Association of Geoscientists & Engineers.
- [21] Hatje, V., Pedreira, R. M., de Rezende, C. E., Schettini, C. A. F., de Souza, G. C., Marin, D. C., & Hackspacher, P. C. (2017). The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific reports*, 7(1), 1-13.
- [22] Arjwech, R., & Everett, M. E. (2015). Application of 2D electrical resistivity tomography to engineering projects: Three case studies. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 37(6).
- [23] Huan, Z., Wang, H., Li, C., & Wan, C. (2017). The soil moisture sensor based on soil dielectric property. *Personal and Ubiquitous Computing*, 21, 67-74.

- [24] Teros 12 Manual (2018-2023), Meter Group.  
[https://publications.metergroup.com/Manuals/20587\\_TEROS11-12\\_Manual\\_Web.pdf](https://publications.metergroup.com/Manuals/20587_TEROS11-12_Manual_Web.pdf).
- [25] Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water resources research*, 16(3), 574-582.
- [26] Herkelrath, W. N., Hamburg, S. P., & Murphy, F. (1991). Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resources Research*, 27(5), 857-864.
- [27] Kelleners, T. J., Soppe, R. W. O., Robinson, D. A., Schaap, M. G., Ayars, J. E., & Skaggs, T. H. (2004). Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2), 430-439.
- [28] Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical SIMULATION1 Geophysical prospecting, 40(4), 453-463.
- [29] Diaz, Esteban (2019). Estimación del grado de saturación a partir de resistividades eléctrica aplicados al caso de una pila de lixiviación: Minera Amalia, Región de Valparaiso. Tesis de grado Magister, Universidad de Chile.
- [30] Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.
- [31] Zohdy, A. A. (1989). A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*, 54(2), 245-253.
- [32] Shima, H. (1990). Two-dimensional automatic resistivity inversion technique using alpha centers. *Geophysics*, 55(6), 682-694.
- [33] Daily, W., & Owen, E. (1991). Cross-borehole resistivity tomography. *Geophysics*, 56(8), 1228-1235.
- [34] Noel, M., & Xu, B. (1991). Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International*, 107(1), 95-102.
- [35] Dey, A., & Morrison, H. F. (1979). Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. *Geophysics*, 44(4), 753-780.
- [36] Silvester, P. P., & Ferrari, R. L. (1996). *Finite elements for electrical engineers*. Cambridge university press.
- [37] Lines, L. R., & Treitel, S. (1984). A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical prospecting*, 32(2), 159-186.
- [38] Inman, J. R. (1975). Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40(5), 798-817.
- [39] Constable, S. C., Parker, R. L., & Constable, C. G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289-300.

- [40] Ellis, R. G., & Oldenburg, D. W. (1994). Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International*, 116(1), 5-11.
- [41] deGroot-Hedlin, C., & Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55(12), 1613-1624.
- [42] Claerbout, J. F., & Muir, F. (1973). Robust modeling with erratic data. *Geophysics*, 38(5), 826-844.
- [43] Wolke, R., & Schwetlick, H. (1988). Iteratively reweighted least squares: algorithms, convergence analysis, and numerical comparisons. *SIAM journal on scientific and statistical computing*, 9(5), 907-921.
- [44] Olayinka, A. I., & Yaramanci, U. (2000). Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 45(2), 63-81.
- [45] Auken, E., & Christiansen, A. V. (2004). Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data. *Geophysics*, 69(3), 752-761.
- [46] Bakken, K. M., Chapin, G. K., & Abrahams, M. (2020). Trigger action response plan development and optimization at the Bingham Canyon Mine. *Slope stability*, 177-190.
- [47] Rücker, C. (2011). Advanced electrical resistivity modelling and inversion using unstructured discretization.
- [48] Günther, T., & Rücker, C. (2015). Boundless electrical resistivity tomography BERT 2—the user tutorial.
- [49] Hou, H., Han, W., Li, T., Wang, H., Du, X., Liu, Z., & Wang, L. (2023). Experimental Study on the Electrical Resistivity Characteristics of Uniformly Graded Calcareous Sand. *Applied Sciences*, 13(20), 11467.