



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y  
TECNOLÓGICA, A.C**

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

***Aplicación de métodos geoelectricos para la detección  
de zonas de filtración en la presa Gonzalo N. Santos,  
San Luis Potosí***

Tesis que presenta

**María Candelaria Hernández Díaz**

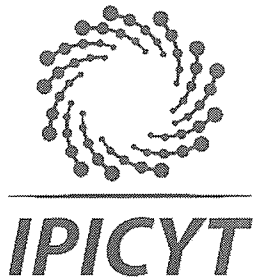
Para obtener el grado de

**MAESTRA EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

Director de Tesis:

**Dr. Omar Delgado Rodríguez**

*San Luis Potosí, S.L.P., agosto 2019*



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Aplicación de métodos geoelectricos para la detección de zonas de filtración en la presa Gonzalo N. Santos, San Luis Potosí**” presentada para obtener el Grado de Maestra en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **María Candelaria Hernández Díaz** y aprobada el dieciséis de agosto del dos mil diecinueve por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

**Dr. Omar Delgado Rodríguez**  
Director de la tesis

**Dr. Vsevolod Yutis**  
Miembro del Comité Tutorial

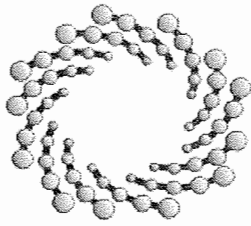
**M. en C. María de los Angeles Ladrón de Guevara Torres**  
Miembro del Comité Tutorial



## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada en las instalaciones de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Omar Delgado Rodríguez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (171066) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



**IPICYT**

# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 041 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 16 días del mes de agosto del año 2019, se reunió a las 10:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. Omar Delgado Rodríguez</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Vsevolod Yutsis _</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres</b>	<b>Sinodal externo</b>	<b>IPN</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRA EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó la C.

**María Candelaria Hernández Díaz**

sobre la Tesis intitulada:

*Aplicación de métodos geoelectricos para la detección de zonas de filtración en la presa Gonzalo N. Santos, San Luis Potosí*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. Omar Delgado Rodríguez**


El Jurado, después de deliberar, determinó

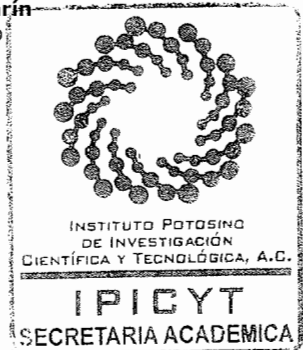
**APROBARLA**

Dándose por terminado el acto a las 11:00 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 16 días del mes de agosto de 2019.

  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado

  
**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico



*A la vida*

*A mi mami*

*A mis sobrinos*

## Agradecimientos

A la *vida*, por situarme en los lugares indicados y así conocer a personas maravillosas.

A mis *padres*, gracias por el esfuerzo y sacrificio que han compartido conmigo a lo largo de esta nueva aventura. Sé que el camino no fue nada fácil, sin embargo... lo logramos.

A mi director de tesis, el *Dr. Omar Delgado Rodríguez*, le agradezco la oportunidad que me brindó para trabajar con él, por las enseñanzas, el apoyo y por la confianza que depositó en mí. A su dedicación, paciencia y preparación durante estos meses de trabajo. Gracias por compartir esta experiencia conmigo.

A la maestra *María de los Ángeles Ladrón de Guevara* y al *Dr. Vsevolod Yutsis* por tomarse el tiempo para compartir sus conocimientos, asesorías y experiencias que ayudaron a fortalecer este trabajo.

Al *CONACYT* por darme la oportunidad de participar como becario y así poder lograr una meta más en mi vida.

Al *Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT)*, a la *División de Geociencias Aplicadas* y a todos los doctores y administrativos que ayudaron a mi formación académica durante mi estancia.

Al *laboratorio de Geofísica del IPICYT* por facilitar el préstamo del equipo adecuado para la elaboración de este proyecto.

A los mejores amigos que pude encontrar, *Jonathan y Erik*, gracias por su incondicional amistad, por las experiencias, aventuras y viajes vividos estos años. Siempre serán mis amix...

A Miriam, Andrés, Alberto, Rodrigo Dávila, Rodrigo Merced, Yoendris, Denisse, Josué Barón, Hugo y a los alumnos de la Universidad de Sonora que realizaron su verano científico en el IPICYT, gracias por regalarme su tiempo, apoyo, esfuerzo y dedicación para realizar las mediciones y este trabajo.

<b>Contenido</b>	
Constancia de aprobación de la tesis	i
Créditos Institucionales	ii
Acta de examen	iii
Agradecimientos	v
Lista de Figuras	xi
Lista de Tablas	xv
Lista de Ecuaciones	xvi
Resumen	xviii
Abstract	xx
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	6
1.3 Hipótesis	7
1.4 Objetivos	7
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	7
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	7
1.5 Antecedentes	8
1.6 Características del área de estudio	14
1.7 Construcción de la Presa	15
1.7.1 <i>Cortina</i>	16
1.7.2 <i>Vertedor</i>	17
1.7.3 <i>Niveles y capacidades del vaso</i>	18
1.7.4 <i>Obra de toma</i>	18
1.8 Marco Geológico	20
1.8.1 Geología Regional	20
1.8.1.1 <i>Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito</i>	24
1.8.2 Geología Local	27
1.8.2.1 <i>Ignimbríta Cantera</i>	27



1.8.2.2 Base sin soldar	28
1.8.2.3 Ignimbrita Cantera Soldada	28
1.8.2.4 Riolita San Miguelito	29
1.8.2.5 Riolita desvitrificada central	30
1.8.2.6 Caparazón	30
<b>Capítulo 2. Marco Teórico</b>	<b>33</b>
Introducción	33
2.1 Resistividad Eléctrica	33
2.2 Conductividad Eléctrica	34
2.3 Doble Capa Eléctrica	36
2.4 Resistividad Aparente	39
2.5 Propiedades Eléctricas de los Materiales Terrestres	41
2.6 Métodos Geofísicos	44
2.6.1 Potencial Espontáneo	46
2.6.1.1 Origen del potencial espontáneo	47
2.6.1.1.1 Potencial de electrofiltración	47
2.6.1.1.2 Potenciales minerales	48
2.6.1.1.3 Potenciales de difusión	49
2.6.1.1.4 Potenciales de sedimentación	49
2.6.1.1.5 Potenciales de adsorción	50
2.6.1.1.6 Potenciales termoeléctricos	50
2.6.1.1.7 Otras fuentes de potenciales	50
2.6.1.2 Fundamento Teórico	52
2.6.1.3 Metodología de campo	54
2.6.1.3.1 Configuración del gradiente	56
2.6.1.3.2 Configuración de base fija (o campo total)	57
2.6.1.3.3 Configuración multielectródica	58
2.6.1.4 Fenómenos que contaminan las medidas de potencial	59
2.6.1.4.1 Polarización y deriva	61
2.6.1.4.2 Corrientes telúricas	62
2.6.1.4.3 Corrientes industriales o asociadas a la actividad humana	62

---

2.6.1.4.4 <i>Efecto Topográfico</i>	62
2.6.1.4.5 <i>Corrosión de elementos metálicos enterrados</i>	62
2.6.2 Método de Perfilaje Electromagnético	63
2.6.2.1 <i>Fundamento teórico</i>	65
2.6.2.2 <i>Metodología de campo</i>	68
2.6.2.3 <i>Ventajas del método</i>	70
2.6.3 Método de Tomografía Eléctrica	71
2.6.3.1 <i>Fundamento Teórico</i>	72
2.6.3.2 <i>Ventajas y desventajas del método</i>	76
2.6.3.3 <i>Metodología de Campo</i>	77
2.6.3.3.1 <i>Configuración Polo-Dipolo</i>	77
2.6.3.3.2 <i>Configuración Dipolo-Dipolo</i>	79
2.6.3.3.3 <i>Configuración Wenner</i>	80
2.6.3.4 <i>Profundidad de investigación</i>	82
2.6.3.5 <i>Sensibilidad</i>	83
2.6.3.6 <i>Relación señal/ruido</i>	84
<b>Capítulo 3. Trabajo de Campo</b>	<b>85</b>
3.1 <i>Adquisición de datos</i>	85
3.2 <i>Mediciones de potencial espontáneo</i>	85
3.2.1 <i>Mediciones Superficiales</i>	86
3.2.1.1 <i>Equipo de medición (electrodos no polarizables)</i>	86
3.2.1.2 <i>Otros materiales y herramientas</i>	87
3.2.1.3 <i>Metodología de adquisición</i>	90
3.2.2 <i>Mediciones sobre el fondo del embalse</i>	91
3.2.2.1 <i>Equipo de Medición</i>	91
3.2.2.2 <i>Otros materiales y herramientas</i>	92
3.3 <i>Mediciones de perfilaje electromagnético</i>	94
3.3.1 <i>Equipo de medición</i>	95
3.4 <i>Mediciones de Tomografía de Resistividad Eléctrica</i>	97
3.4.1 <i>Corona de la cortina</i>	97
3.4.1.1 <i>Equipos de medición</i>	99

3.4.1.2 <i>Otros materiales y herramientas</i>	99
3.4.2 <i>Orilla derecha de la presa</i>	100
3.4.3 <i>Aguas abajo</i>	102
3.4.3.1 <i>Equipos de medición</i>	104
3.4.3.2 <i>Otros materiales y herramientas</i>	104
<b>Capítulo 4. Resultados</b>	106
4.1 Análisis de potencial espontáneo	106
4.2 Análisis de perfilaje electromagnético	115
4.3 Análisis de tomografías de resistividad eléctrica	118
4.4 Análisis de salinidad de agua	123
4.5 Comparación de resultados de PE, PEM y TRE	127
4.6 Comparación de resultados de PE y TRE en la cortina	129
<b>Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones</b>	132
<b>Referencias</b>	135

---

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Trabajos y reparaciones en la cortina de la presa Gonzalo N. Santos. a) Ranurado de la junta de dilatación para su tratamiento; b) Relleno de oquedad; c) Oquedades tratadas; d) Vista general de los trabajos	13
<b>Figura 2.</b> Ubicación de la Presa Gonzalo N. Santos	14
<b>Figura 3.</b> Vista general de la presa Gonzalo N. Santos	15
<b>Figura 4.</b> Cortina de la presa Gonzalo N. Santos. a) Aguas abajo (tipo enrocamiento); b) Aguas arriba (cara de concreto)	16
<b>Figura 5.</b> Sección transversal de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos (CONAGUA, 1998)	17
<b>Figura 6.</b> Vertedor de cresta libre, presa Gonzalo N. Santos, S.L.P.	17
<b>Figura 7.</b> a) Vista aérea del embalse; b) Vista general del embalse	18
<b>Figura 8.</b> a) Caseta de operaciones de válvulas; b) Tuberías subterráneas	19
<b>Figura 9.</b> Ubicación del estado de San Luis Potosí	20
<b>Figura 10.</b> Ubicación de los Campos Volcánicos de San Luis Potosí (Tristán González et al. 2009)	23
<b>Figura 11.</b> Ubicación del Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito y la ubicación de la presa Gonzalo N. Santos	26
<b>Figura 12.</b> Geología local y estructural de la presa Gonzalo N. Santos	31
<b>Figura 13.</b> Ejemplo de un medio heterogéneo en el subsuelo	41
<b>Figura 14.</b> Resumen de diversos fenómenos que perturban la señal de campo (Mainali, et al. 1999),	60
<b>Figura 15.</b> Configuración del Perfilaje Electromagnético	64
<b>Figura 16.</b> Ejemplo de las diferentes sensibilidades que presentan el dipolo. a) Polarización vertical; b) Polarización horizontal	67

<b>Figura 17.</b> Representación esquemática del método Slingram; $s$ es la distancia entre las espiras, $H_s$ campo secundario y $H_p$ campo primario. (Serral, et al. 2011)	68
<b>Figura 18.</b> Comportamiento de la corriente inyectada en el subsuelo, donde A y B son los electrodos de corriente, y M-N los electrodos de potencial (Díaz Anaya 2010).	72
<b>Figura 19.</b> Esquema de la Tomografía de Resistividad Eléctrica	73
<b>Figura 20.</b> Representación simplificada de la técnica de TRE. (Zúñiga, 2002)	74
<b>Figura 21.</b> Diversas configuraciones. a) Wenner-Schlumberger; b) Polo-Dipolo; c) Wenner; d) Dipolo-Dipolo; e) Polo-Polo	75
<b>Figura 22.</b> Esquema de la configuración electródica del dispositivo Polo-Dipolo	77
<b>Figura 23.</b> Dispositivo Polo-Dipolo inverso	78
<b>Figura 24.</b> Esquema de la configuración electródica del dispositivo Dipolo-Dipolo	79
<b>Figura 25.</b> Esquema de la configuración electródica del dispositivo Wenner	81
<b>Figura 26.</b> Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los diferentes dispositivos (López, s/f)	83
<b>Figura 27.</b> Electrodo empleados para las mediciones de PE en la presa Gonzalo N. Santos, a) Electrodo no polarizables, b) Electrodo amarrado al dispositivo de madera y conectado al multímetro	87
<b>Figura 28.</b> Dispositivo utilizado para las mediciones de PE en la presa Gonzalo N. Santos	88
<b>Figura 29.</b> Mediciones de PE con el dispositivo armado	88
<b>Figura 30.</b> Distribución de los perfiles de PE superficiales en la presa Gonzalo N. Santos	89
<b>Figura 31.</b> Dispositivo elaborado para la toma de datos profundos	92
<b>Figura 32.</b> Mediciones de PE con el dispositivo armado	93

<b>Figura 33.</b> Distribución de los perfiles de PE profundos en la presa Gonzalo N. Santos	94
<b>Figura 34.</b> Ubicación y distribución de los perfiles de perfilaje electromagnéticos	95
<b>Figura 35.</b> Equipo EM31	96
<b>Figura 36.</b> Distribución de los perfiles de TRE; a) Perfil AMN; b) Perfil MNB	98
<b>Figura 37.</b> Tomografía eléctrica sobre la corona de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos	98
<b>Figura 38.</b> Equipo Syscal R2 (empleado para la adquisición de datos en la corona de la presa)	99
<b>Figura 39.</b> Distribución de la TRE sobre la orilla derecha de la presa	101
<b>Figura 40.</b> Mediciones de TRE. a) Distribución del perfil; b) Mediciones de GPS Diferencial sobre la orilla derecha de la presa Gonzalo N. Santos	102
<b>Figura 41.</b> Distribución de la TRE aguas abajo de la presa	103
<b>Figura 42.</b> Mediciones de TRE aguas abajo de la Presa Gonzalo N. Santos	103
<b>Figura 43.</b> Equipo Syscal Kid (utilizado para la toma de datos en la orilla y aguas abajo de la presa)	104
<b>Figura 44.</b> Mapa de anomalías de mediciones de PE superficial	107
<b>Figura 45.</b> Mapa de la profundidad de la presa Gonzalo N. Santos. a) Vista en planta del embalse y su profundidad; b) Vista en 3D de la profundidad del embalse	109
<b>Figura 46.</b> Ubicación de los perfiles con medidas simultáneas	110
<b>Figura 47.</b> Gráficas comparativas del mes de octubre. a) Comparativa entre diferencias (PE superficial-PE profundo) respecto a la profundidad; b) Grafica de correlación	111
<b>Figura 48.</b> Gráfica comparativa del mes de septiembre perfil 2. a) Comparativa entre diferencias (PE superficial-PE profundo) respecto a la profundidad; b) Grafica de correlación	113
<b>Figura 49.</b> Mapa de anomalías de PE profundo	114

<b>Figura 50.</b> Mapa de Perfilaje Electromagnético	118
<b>Figura 51.</b> Secciones de TRE en la corona de la cortina. a) Perfil AMN en dirección de la margen izquierda hacia el vertedor; b) Perfil MNB en dirección del vertedor hacia la margen izquierda	120
<b>Figura 52.</b> Sección de TRE, orilla derecha de la presa. a) Ubicación en planta del perfil de TRE sobre la presa Gonzalo N. Santos, b) Distribución de las mediciones sobre el perfil de TRE, c) Sección de TRE orilla derecha	121
<b>Figura 53.</b> Ubicación de la sección de TRE aguas abajo de la presa. a) Ubicación en planta del perfil de TRE sobre la presa Gonzalo N. Santos, b) Distribución de las mediciones sobre el perfil de TRE, c) Sección de TRE aguas abajo	122
<b>Figura 54.</b> Sección de TRE aguas abajo de la presa	123
<b>Figura 55.</b> Ubicación de los puntos de emanación de agua abajo de la cortina de la presa	124
<b>Figura 56.</b> Puntos de emanación de agua localizados agua abajo de la cortina	125
<b>Figura 57.</b> Mapa comparativo entre método PEM, PE y TRE	128
<b>Figura 58.</b> Mapa comparativo entre métodos PE y TRE	130
<b>Figura 59.</b> Mapa de las direcciones y ubicaciones de las filtraciones en la presa Gonzalo N. Santos	131

## **Lista de Tablas**

- Tabla 1.** Valores de resistividad de rocas, minerales, aguas, sedimentos químicos, minerales y materiales (Tomada de Díaz Anaya, 2010) 43
- Tabla 2.** Salinidad de las diversas muestras de agua, recolectadas aguas abajo de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos 126



## Lista de Ecuaciones

Ecuación (1). Resistividad eléctrica	34
Ecuación (2). Conductividad eléctrica	34
Ecuación (3). Resistividad eléctrica	40
Ecuación (4). Corriente eléctrica de convección	52
Ecuación (5). Corriente de conducción	53
Ecuación (6). Ecuación adquirida de realizar pasos algebraicos	53
Ecuación (7). Cociente de potencial de transmisión C	53
Ecuación (8). Ley de Gaus en magnetismo	65
Ecuación (9). Ley de Gaus en electricidad	65
Ecuación (10). Ley de Faraday	65
Ecuación (11). Ley de Ampere-Maxwell	65
Ecuación (12). Campo de desplazamiento eléctrico	65
Ecuación (13). Inducción magnética	65
Ecuación (14). Densidad de corriente	65
Ecuación (15). Polarización eléctrica	66
Ecuación (16). Polarización magnética	66
Ecuación (17). Ley de Gauss para el campo magnético	66
Ecuación (18). Ley de Gauss	66
Ecuación (19). Ley de Faraday	66
Ecuación (20). Ley de Ampere	66

Ecuación (21). Relación entre los dos campos magneticos (primario y secundario)	66
Ecuación (22). Resistividad aparente para la configuración Polo-Dipolo	77
Ecuación (23). Resistividad aparente para la configuración Dipolo-Dipolo	80
Ecuación (24). Resistividad aparente para la configuración Wenner	81

## Resumen

### **Aplicación de métodos geoelectricos para la detección de zonas de filtración en la presa Gonzalo N. Santos, San Luis Potosí.**

El propósito fundamental del trabajo titulado “Aplicación de métodos geoelectricos para la detección de zonas de filtración en la presa Gonzalo N. Santos, San Luis Potosí”, es la determinación de áreas de filtración en la cortina y en el vaso de la presa, la cual se encuentra deteriorada como consecuencia de los muchos años de uso y su falta de mantenimiento. Para este estudio se utilizó, como método fundamental, el Potencial Espontáneo (PE), que mediante sus dos variantes desarrolladas (mediciones superficiales y mediciones sobre el fondo del embalse) permitió definir las zonas de filtración en la estructura de la cortina y en el vaso del embalse. Los métodos geoelectricos Perfilaje Electromagnético (PEM) Y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) fueron útiles en verificar anomalías de PE en la orilla de la presa, la cortina y aguas abajo. Cuatro zonas de filtración fueron determinadas; dos en el vaso de la presa, coincidente con una depresión topográfica y con la dirección NW-SE de las fallas geológicas de la región. Las dos zonas de filtración restantes fueron localizadas en la cortina de la presa; una en la margen izquierda de la cortina (hacia la carretera) y la otra en su porción central. Las zonas de filtración en la cortina fueron correlacionadas con el modelo geoelectrico determinado en la cortina y aguas abajo, dando como resultado la localización de dos canales de flujos de agua a través de la cortina y, finalizando con la ubicación de tres puntos surgencia de agua ubicados aguas abajo cuyas salinidades correspondieron con la del agua de la presa. Los resultados alcanzados de la

aplicación de los métodos geoelectricos mostraron su alta eficiencia en la determinación de zonas de filtración, mediante anomalías de bajas resistividades (PEM y TRE) y de potenciales anómalos negativos de PE. Estos resultados serán útiles en la toma de medidas correctivas en la cortina de la presa, con el propósito de eliminar o disminuir el caudal de agua de fuga en la base de la cortina, asegurando su integridad estructural.

**PALABRAS CLAVES:** presa, potencial espontáneo, perfilaje electromagnético, tomografía de resistividad eléctrica, zonas de filtración.

## Abstract

### **Application of geoelectric methods for the detection of filtration zones in the Gonzalo N. Santos dam, San Luis Potosí**

The main purpose of this study entitled “Application of geoelectric methods for the detection of filtration zones in the Gonzalo N. Santos dam, San Luis Potosí”, is the location of filtration zones in the dam body and at the bottom of the reservoir; which is deteriorated as a result of their use for many years and a lack of maintenance periods. In this study, as a main method, Spontaneous Potential (SP) was used in two variants (surface measurements and measurements on the bottom of the reservoir) for detect the filtration zones in the dam body and at the bottom of the reservoir. The Electromagnetic Profiling (EMP) and Electrical Resistance Tomography (ERT) were useful in verifying the anomalies of SP at the shore, the dam body and downstream. Four filtration zones were located; two at the bottom of the reservoir, coinciding with a topographic depression with NW-SE direction, according to the regional direction of faults. The two remaining filtration zones were located in the dam body; one in the left margin of the dam (towards the federal highway) and the other in the central portion of the dam body. The filtration zones in the dam body were correlated with the geoelectric models of the dam core and subsoil downstream, resulting on location of two seepage flows, and finally, three leakage points downstream with water salinity value similar to the reservoir water. The results obtained from the application of the geoelectric methods shown high efficiency in the delimitation of filtration zones, as resistivity anomalies (EMP and

ERT) and negative potential anomalies (SP). These results will be useful to plan the repair work in the dam body, in order to eliminating or decreasing leakage flow, ensuring the structural integrity of the dam body.

KEYWORDS: dam, spontaneous potential, electromagnetic profiling, electrical resistivity tomography, filtration zones.

## **Capítulo 1. Introducción**

### **Introducción**

La necesidad de aprovechar los recursos hídricos en el mundo se ha incrementado considerablemente en las últimas décadas, como resultado principal de un crecimiento de la población y la urbanización. *En una escala global, existen aproximadamente 1,385 millones de km<sup>3</sup> de agua en el planeta; sin embargo, el 97% es agua de mar y solamente el 2.67% es agua fresca. Del total de esa cantidad de agua fresca (37 millones de km<sup>3</sup>) el 76.5% está almacenada en los polos y glaciares. Otro 22.9% está presente como agua subterránea y una pequeña fracción de 1,500 km<sup>3</sup> (0.004%) aparece en algún momento en los ríos del planeta (Guevara, 2007).*

Aun cuando la cantidad de agua dulce aprovechable pudiera ser suficiente para cubrir las necesidades humanas, existen serios problemas en cuanto a contar con una disponibilidad estable; ya que pueden ocurrir ciertas variaciones tanto en tiempo como en espacio, esto es, cortos periodos de intensas precipitaciones para después presentarse largos periodos de sequía. Asimismo, se tiene que grandes cantidades de agua subterránea se encuentren contaminadas o ubicadas a gran profundidad convirtiéndola en inutilizable para el consumo humano y otras actividades.

El abastecimiento de agua para los *824, 229 millones de habitantes* (INEGI, 2015) de la capital del estado de San Luis Potosí, es una de las principales prioridades del municipio potosino, ya que la demanda de agua es de *240 L/día* (INTERAPAS 2013). Dentro de las fuentes de agua subterránea se encuentran 126 pozos que

producen 3,000 L/s, para atender el 84% de la población, mientras que el 16% restante se abastece de las presas de almacenamiento San José, Gonzalo N. Santos y El Potosino.

La presa Gonzalo N. Santos, ubicada en el municipio de San Luis Potosí, fue construida por la Secretaria de Recursos Hidráulicos (SRH) entre 1949 y 1953 sobre el arroyo Las Cabras, captando agua de la cuenca Presa San José-Los Pilares. Los objetivos de esta obra hidráulica son de almacenamiento, control de avenidas, suministro de agua potable, acuacultura y pesca, así como actividades recreativas.

La presa está constituida de una cortina de sección de enrocamiento con una pantalla de concreto reforzado, tiene una altura de 39 m y una longitud de 160 m hasta el vertedor. Se encuentra desplantada en Ignimbríta Riolítica que sobreyace a una Toba Riolítica, que se encuentra muy fracturada en la margen izquierda.

A partir de su primer llenando la presa Gonzalo N. Santos presentó filtraciones aguas abajo de la cortina, sin embargo, no se contaba con datos de la magnitud de las mismas, hasta que, en el año de 1986, el personal de la entonces Residencia de Ingeniería de Ríos estimó una pérdida de 0.300 m<sup>3</sup>/seg (CONAGUA, 2004). Parte de esas filtraciones se aprovechaban en el Centro Acuícola y el resto era retenida en el vaso de la presa San José. De 1990 a 1998, periódicamente se cuantificaron las filtraciones las cuales aumentaban y disminuían de acuerdo a la capacidad del embalse; por tal motivo se llevó a cabo el estudio de determinación del origen de las filtraciones con siembra de colorantes, estudios geológicos en la zona de la boquilla con exploraciones directas y pruebas de permeabilidad.



Dichos estudios concluyeron que la zona crítica se localizaba en la margen izquierda, en el fracturamiento del macizo rocoso y el contacto con la pantalla de concreto; estas evidencias se apreciaban a partir de la elevación 2024.70 m.s.n.m. donde se observaban desplazamientos de cuñas de roca en el macizo rocoso.

El presente trabajo contempla una evaluación geoelectrica empleando los métodos de Potencial Espontáneo (PE), Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Perfilaje Electromagnético (PEM), con el propósito de establecer secciones y mapas que indiquen la existencia o no de zonas actuales de filtración, así como sus orígenes, es decir, si estos son causados por fallas estructurales en la cortina o si son generados por condiciones geológicas-tectónicas.

## **1.1 Planteamiento del problema**

Se han dedicado esfuerzos para caracterizar la presa Gonzalo N. Santos algunos años después de su construcción. Entre estos trabajos se encuentran los realizados por el Organismo Intermunicipal de Agua Potable y Saneamientos (INTERAPAS, 1997), la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1997), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 1998), cuyos resultados coincidieron en que una parte de la cortina presentaba zonas muy fracturadas y altamente permeables. Por otra parte, en 1998 INTERAPAS, concluyó en uno de sus informes, que las filtraciones se presentaban en un área cercana a la junta del plinto, la cual, debido a su tiempo de construcción, había cumplido su vida útil.

La presa continuó operando bajo condiciones adecuadas de seguridad estructural, ya que las filtraciones no pusieron en riesgo la estabilidad de la cortina. Es urgente, dada la ubicación de la presa y el riesgo que representa para las comunidades

colindantes una ruptura mayor de la cortina, la realización de un estudio detallado para la detección de zonas de filtraciones y sus causas, de tal manera que, en caso necesario, se puedan realizar de manera efectiva trabajos de reparación de la misma.

Los métodos eléctricos se basan en el estudio de campos de potencial eléctrico tanto naturales, como artificiales. Mediante estas mediciones se pueden determinar las problemáticas en el subsuelo, reconocer estructuras o accidentes geológicos entre otras variantes. Los métodos eléctricos y sus análisis han sido frecuentemente utilizados en varios estudios relacionados con presas, como, por ejemplo, los trabajos realizados por Davydov y colaboradores (2016), quienes utilizaron métodos eléctricos tales como, Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), mediciones de campo eléctrico natural y electrotomografía, para la valoración de la estabilidad de presas en Rusia, evaluando sus lechos rocosos sin intervenir en su estructura. Además, son capaces de localizar partes afectadas de la presa, incluidas áreas de filtraciones.

Otro de los trabajos realizados fueron los de Rozycki y colaboradores (2006), los cuales a través del método de potencial espontáneo pudieron configurar anomalías producto de una filtración. Basados en la interpretación cualitativa del campo eléctrico estudiaron el desarrollo de las filtraciones en el caso de tubificación o sifonamiento en diversos tipos de presas ubicadas en España.

Andaverde Arredondo (1999), realizó estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos, para determinar las propiedades de las rocas y de los fluidos que

podieran contener. El objetivo principal fue la determinación de los mecanismos de filtración de agua que tienen lugar en la Presa El Cuchillo en Nuevo León, México.

Mientras que Mainali (2006), realizó estudios para determinar la aplicabilidad de métodos geofísicos, principalmente resistividad eléctrica y potencial espontáneo, para detectar filtraciones anómalas a través de diques, así como monitorear la condición física de la presa. Dichos métodos fueron aplicados en presas y taludes ubicadas en Suecia.

Por otra parte, Martínez y colaboradores (2003), utilizaron una serie de técnicas geoelectricas que resultaron efectivas en la detección de filtraciones o fugas de agua a través del revestimiento de embalses, pantanos u otro tipo de estructuras hidráulicas de almacenamiento. La información que proporcionan estas técnicas permiten conocer el estado del revestimiento frente a posibles roturas, cortes accidentales o perforaciones, ubicando a tiempo los puntos de fuga y poder llevar a cabo la reparación correspondiente, mitigando de esta manera el peligro que podría correr la integridad de la estructura hidráulica y evitando la pérdida del agua y sus graves efectos en el entorno.

Los métodos geoelectricos tienen la ventaja de llevar a cabo de manera rápida y sencilla la descripción y análisis de las cortinas, cuya importancia radica en el entendimiento de las propiedades eléctricas del suelo, ante la acción de un campo eléctrico, ya sea de forma natural o artificial. De las diferentes técnicas que emplean campos eléctricos para la caracterización del subsuelo, PE, TRE y PEM han tenido gran aceptación debido a su bajo costo y fácil implementación, tanto en el trabajo de campo como en el procesamiento de los datos.

## **1.2 Justificación**

Las presas proporcionan grandes beneficios al ser humano, pero también resultan potencialmente peligrosas. Incidentes con severas consecuencias han ocurrido a lo largo de la historia en diversas presas del mundo, ante esta situación, se ha despertado una preocupación justificada, ya que la súbita liberación de millones de metros cúbicos de agua sobre las poblaciones puede causar enormes pérdidas humanas y materiales, además de graves daños al medio ambiente.

A nivel internacional, se ha señalado que las rupturas de las cortinas se deben a tres problemáticas comunes: tubificación, falla de la cimentación y desbordamiento por avenidas (Morengo, 1996). En nuestro país, no se ha dado el seguimiento preciso a estos eventos; por esta razón, es de vital importancia la mitigación del riesgo, elaborando estudios que estimen las diferentes características del proyecto, para conjuntarlas a reglamentos y códigos para el buen diseño de construcciones y obras importantes.

Para el caso de la presa Gonzalo N. Santos, dada su importancia estratégica en el abastecimiento de agua a la ciudad de San Luis Potosí y a la presencia de poblados aguas abajo, tales como Escalerillas, es imprescindible la realización de estudios periódicos que verifiquen la integridad de la cortina y de la fuga de agua en general, de tal manera que, en caso necesario, tomar medidas preventivas y no correctivas como lamentablemente sucede con frecuencia, evitando futuros desastres.

### **1.3 Hipótesis**

La presa Gonzalo N. Santos presenta zonas de filtración o fuga de agua dado por causas geológicas-tectónicas en el vaso de la presa y/o fallas estructurales en la cortina que pueden ser identificadas mediante la aplicación de métodos geoelectrónicos.

### **1.4 Objetivos**

#### ***1.4.1 Objetivo general***

Elaborar los mapas de la ubicación de las zonas de filtración en la porción más cercana a la cortina de la presa Gonzalo N. Santos mediante la aplicación del método de Potencial Espontáneo y determinar sus causas a partir de la utilización de los métodos geoelectrónicos como Tomografía de Resistividad Eléctrica y Perfilaje Electromagnético, los cuales servirán para delimitar las zonas de alto riesgo y poder tomar acciones correctivas y preventivas.

#### ***1.4.2 Objetivos Específicos***

- Elaborar el mapa de las zonas de filtración en la cortina basado en mediciones de PE sobre el agua.
- Elaborar el mapa de las zonas de filtración en la porción del vaso de la presa próximo a la cortina basado mediciones de PE sobre el agua y sobre el fondo de la presa.
- Determinar las causas de las filtraciones (fallas geológicas, fallas estructurales) mediante la aplicación de los métodos PEM y TRE.

## 1.5 Antecedentes

El agua forma parte fundamental en la vida del hombre, ya que se utiliza para desarrollar diversas actividades y procesos de consumo, como la agricultura, la industria, el hogar y otros sectores, así como en la generación de energía eléctrica. Gracias al agua es posible dar movimiento a grandes ciudades como a pequeñas comunidades.

Las necesidades de aprovechar este recurso se han incrementado como resultado principal del crecimiento demográfico, ya que al existir un mayor número de consumidores se genera un mayor número de procesos, tanto industriales como de consumo directo a la población. Los problemas de abastecimiento de agua han sido constantes desde épocas muy antiguas, y desde entonces se ha buscado la manera de resolverlos, considerando su almacenamiento y conservación, como puntos principales.

El abastecimiento y la captación de agua constituyen un reto dentro del valle de San Luis Potosí, ya que, al encontrarse dentro de una zona árida, las lluvias son escasas, limitando este recurso hídrico a pocas cantidades durante todo el año. La zona metropolitana del estado se abastece de dos fuentes principales, una de tipo superficial y otra de tipo subterránea, siendo esta última la que más aporta a la demanda de agua potable de la ciudad.

Las fuentes de agua subterránea provienen del acuífero de San Luis, el cual está conformado por dos mantos, uno a nivel intermedio, conocido como freático o libre, y el otro más profundo o subterráneo. Esta fuente cuenta con 126 pozos que se utilizan para abastecer a la zona metropolitana (INTERAPAS, 2005). Mientras que

las fuentes superficiales están integradas por el sistema de presas *Gonzalo N. Santos* - El Potosino - San José las cuales son utilizadas como fuente de abastecimiento para la *zona urbana de la capital*. El agua que se capta en ellas se conduce a la planta potabilizadora Los Filtros para someterla a un proceso de potabilización y después distribuirla; además de que actúan como reserva para épocas de estiaje. También existe la presa La Cañada del Lobo, sin embargo, su única finalidad es para uso agrícola, el control de avenidas e inundaciones que pudieran afectar a la región (CONAGUA, 2004).

La presa Gonzalo N. Santos fue construida con el propósito de almacenamiento de agua y control de avenidas; además el agua almacenada se utiliza para actividades recreativas, así como para acuacultura y pesca al abastecer al centro acuícola El Peaje.

Durante los últimos 66 años la presa Gonzalo N. Santos ha cumplido sus propósitos de construcción, sin embargo, estudios realizados en el año 2017 por INTERAPAS, dieron a conocer que la presa solo puede almacenar agua a un 30% de su capacidad.

Debido a la gran carga hidráulica a la cual están sometidas las cortinas de las presas, estas sufren ciertas deformaciones a lo largo de los años; y la presa Gonzalo N. Santos no fue la excepción, ya que deformaciones e infiltraciones al pie de la cortina fueron reportadas durante el año de 1997, específicamente INTERAPAS informo que las filtraciones observadas al pie de la cortina aguas abajo marcaban un máximo de 800 l/seg cantidad que representa una gran pérdida de agua, asumiendo su origen a la existencia de una fractura en el contacto de la losa de revestimiento de la cortina y su empotramiento en el dentellón (INTERAPAS, 2013).

A pesar de representar una gran cantidad de agua, en ese año no se lograron tomar acciones ni medidas preventivas debido a que el nivel del agua en el embalse era alto, por lo que se tuvo que esperar a que el embalse desaguara de forma natural. Posteriormente se realizaron observaciones no solo de las filtraciones, sino también de las deformaciones que sufre la cortina, ya que el gasto de la filtración era elevado y podría deformar aún más el contacto losa-dentellón.

Para finales del mes de abril de 1998 el embalse desaguó totalmente y se pudo tener acceso a todo lo largo de la losa en su contacto con el dentellón, sin observarse fracturas o desplazamientos. La causa principal de una pérdida tan fuerte de agua se debió a un socavón ubicado en el empotramiento izquierdo, donde la geología y la tectónica en esta porción de la presa facilitaron el flujo de agua generando una grieta profunda. Una vez determinado la problemática se diseñó un relleno de concreto en la zona socavada y un intenso tratamiento de inyección a lo largo del contacto losa-terreno para prevenir la repetición del fenómeno. Aprovechando el hecho de que se desaguó totalmente el embalse, se realizó un tratamiento de impermeabilización adicional en la ladera derecha cercana a la obra de toma, ya que el azolve alcanzaba niveles más altos que la entrada de la toma, optándose por la construcción de una nueva estructura de entrada que consistió en una torrecilla de concreto reforzado con rejillas de sección rectangular con una altura de 11.4 m, que dispone de dos rejillas frontales con umbral, la más baja en la elevación 2025 m.s.n.m. y una horizontal en la parte superior. Para evitar que el azolve que se seguirá acumulando penetre en esta nueva estructura, aguas arriba de ella se colocó un filtro de arena-gravas.

Otras reparaciones y modificaciones que se realizaron fueron el cambio de válvulas



de servicio y de emergencia, además de la remodelación de la corona. Para el mismo año se efectuó un recorrido por la cortina y taludes de la presa, se inspeccionó el túnel donde se alojan las tuberías de la obra de toma, y se hizo un recorrido de las laderas y la descarga del vertedor; así como al pie de la cortina donde se presentaban las principales filtraciones. Las observaciones que se obtuvieron fueron las siguientes:

- Parapeto de aguas arriba de la cortina, se observó sin grietas, ni fisuras en la superficie expuesta.
- Parapeto de aguas abajo, el enrocamiento, es el del acomodo original y no presenta movimiento ni desplazamiento.
- En la corona de la cortina se encuentran los mismos asentamientos, sin alteraciones de acuerdo a los reportados en informes con fechas de 1991.
- En la zona del vertedor se contemplaron filtraciones a través de la roca de cimentación, pero éstas son de aguas claras sin arrastre de partículas.
- En el túnel de la obra de toma se observan filtraciones provenientes de la válvula de la obra de toma. Por lo que se requiere de la rehabilitación de las válvulas de servicio y de emergencia, así como de la tubería.
- Al pie de la cortina se observaron filtraciones claras y sin arrastre de partículas, por lo que dichas filtraciones están ocurriendo en el plinto de la estructura y en menor proporción en la cimentación.

En base a lo anterior se propusieron acciones inmediatas como:

- Primera etapa: sugirieron un tratamiento y relleno en las grietas y fracturas del macizo rocoso de la margen izquierda con concreto e inyección de

mortero y/o lechada de agua.

- Segunda etapa: se basó en la ejecución de tratamientos e impermeabilizaciones.

Este programa de mantenimiento de la presa concluyó en los primeros días del mes de junio de 1998. Para 2010 se efectuó la rehabilitación de las válvulas de servicio y de emergencia.

Actualmente se desconoce el estado de la presa y la existencia de daños graves o importante, sin embargo, es primordial realizar estudios periódicos, no solo para determinar la existencia de desplazamientos o filtraciones en diversas zonas de la cortina, sino también para prevenir alguna catástrofe que pueda afectar aguas abajo a la población de Escalerillas, municipio de San Luis Potosí en caso de una ruptura o de que el vertedor descargue con un gasto mayor.

A continuación, se presentan una serie de fotografías (Fig.1) tomadas al momento de la reparación de los distintos trabajos hechos en la cortina, dichas imágenes fueron obtenidas del reporte elaborado por INTERAPAS y la Comisión Estatal del Agua, 2004.



a)



b)



c)



d)

*Figura 1. Trabajos y reparaciones en la cortina de la presa Gonzalo N. Santos. a) Ranurado de la junta de dilatación para su tratamiento; b) Relleno de oquedad; c) Oquedades tratadas; d) Vista general de los trabajos*

## 1.6 Características del área de estudio

La presa Gonzalo Natividad Santos, comúnmente conocida como El Peaje, se localiza al sureste del estado de San Luis Potosí, al lado izquierdo de la carretera federal 70 en dirección a Aguascalientes. La cortina se encuentra entre los paralelos 22° 05' 32' latitud norte y 101° 05' 55" longitud oeste (Fig.2).

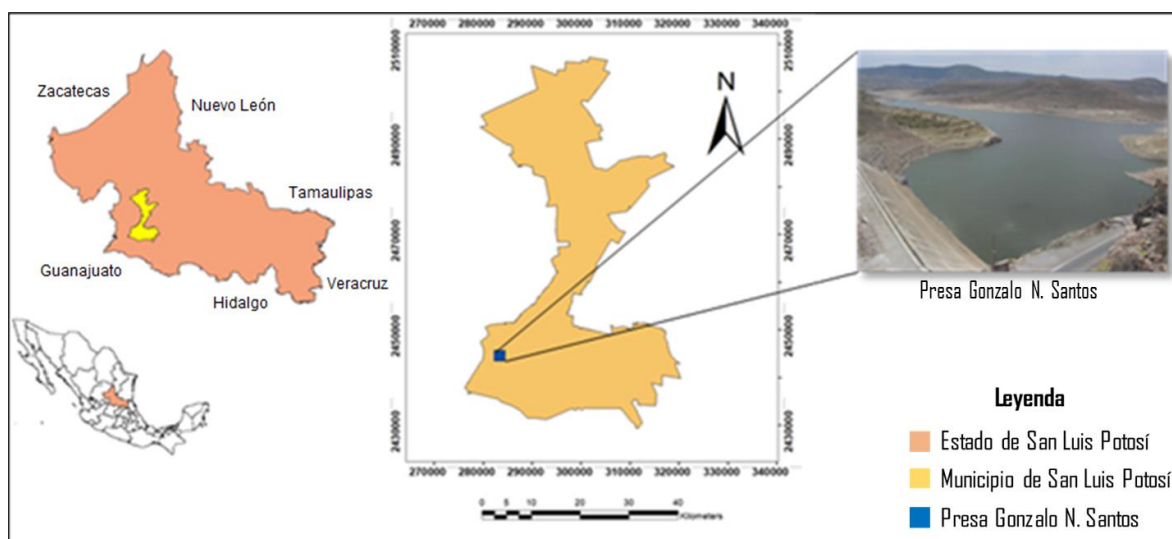


Figura 2. Ubicación de la Presa Gonzalo N. Santos

La presa Gonzalo N. Santos forma parte de la región Cuencas Centrales del Norte, dentro de la región hidrológica El Salado, y pertenece a la cuenca Presa San José-Los Pilares. La entrada de agua corresponde al arroyo Grande o Azul, el cual es un afluente del río Santiago. La presa ocupa un área total de 81 km<sup>2</sup> de la cuenca hasta el sitio de la cortina.

## 1.7 Construcción de la Presa

Los trabajos de construcción de la presa Gonzalo N. Santos se iniciaron en el año de 1949, y fueron supervisados por la Secretaria de Recursos Hidráulicos (SRH), la obra fue terminada en 1953 y finalmente fue operada por primera vez en el año de 1956.

En la figura 3 se presenta una vista en planta de la distribución de las estructuras que conforman a la presa Gonzalo N. Santos (CONAGUA, 1998).

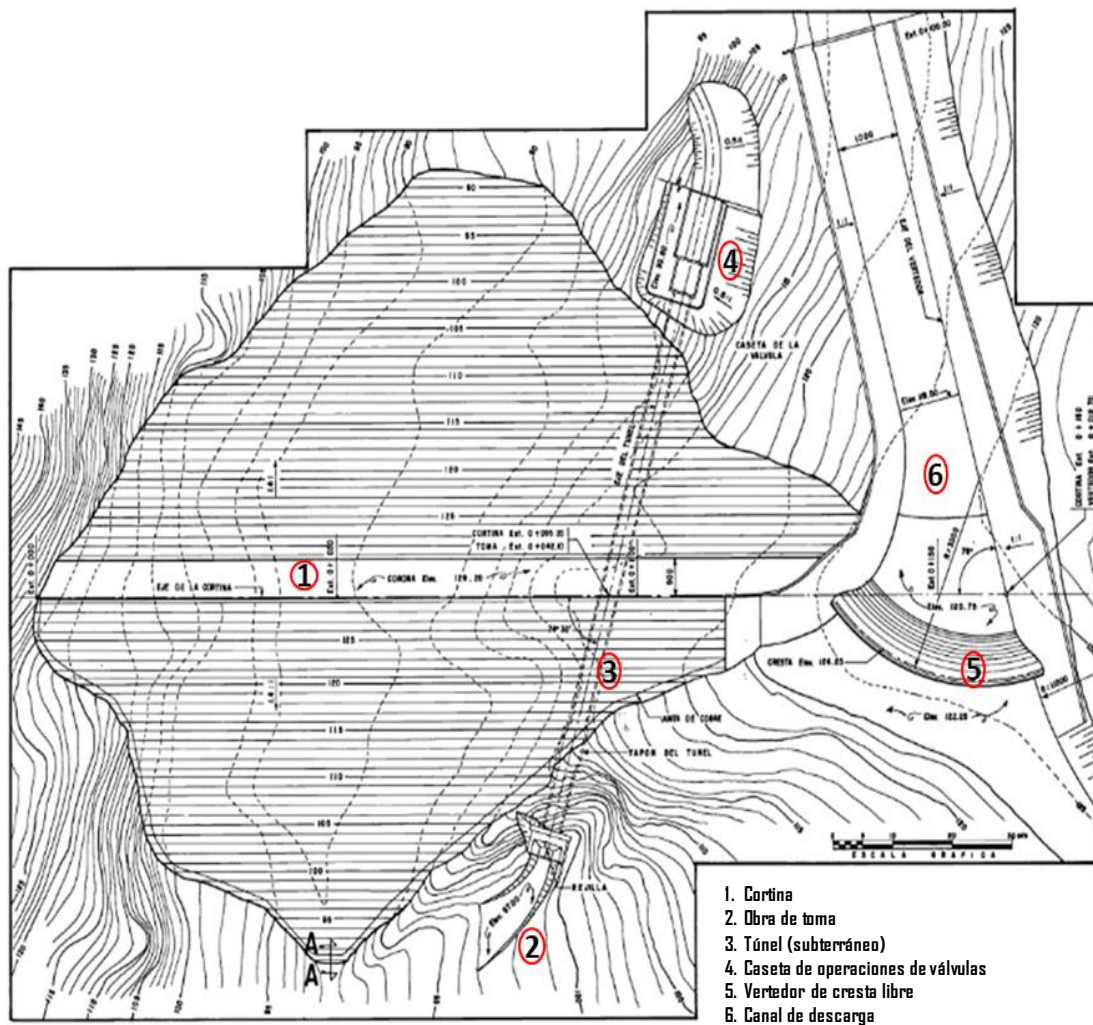


Figura 3. Vista general de la presa Gonzalo N. Santos

### 1.7.1 Cortina

La cortina de la presa Gonzalo N. Santos, se clasifica dentro del tipo tierra y/o enrocamiento, cuyos materiales son enrocamiento con cara de concreto, tiene una longitud de 160 m, una altura máxima de 39 m, y 6 m de ancho de corona. La elevación de la corona es a la cota 2049 m.s.n.m. y su cimentación es de tipo rocosa (Fig.4).



*Figura 4. Cortina de la presa Gonzalo N. Santos. a) Aguas abajo (tipo enrocamiento): b) Aguas arriba (cara de concreto)*

Los taludes aguas arriba y aguas abajo son de 1.2:1 y 1.4:1 respectivamente; para el talud aguas arriba se colocó enrocamiento acomodado a mano y se instaló una losa de concreto reforzado y de grueso variable, (mínimo 20 cm en la corona) que se apoya en el extremo inferior de un block de concreto simple, en el que su base se liga al dentellón sobre el cual se forma la pantalla de impermeabilización. Mientras que para el talud aguas abajo se utilizó enrocamiento a volteo. En la figura 5 se presenta una sección transversal de la cortina.

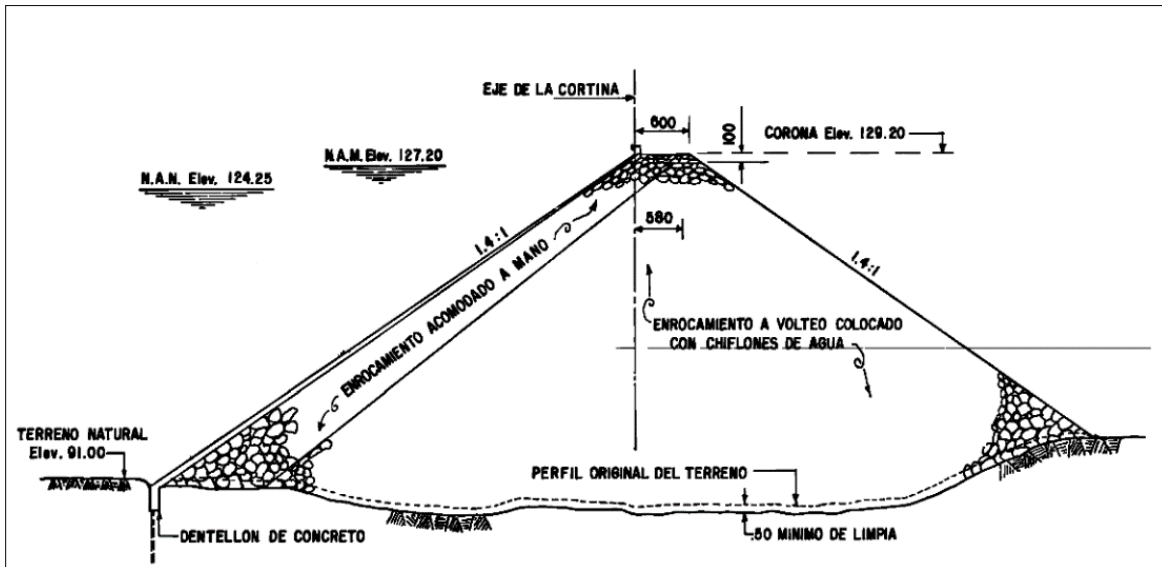


Figura 5. Sección transversal de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos (CONAGUA, 1998)

### 1.7.2 Vertedor

El vertedor de la presa se ubica en el extremo derecho de la cortina, y consiste en un cimacio de perfil Creager de concreto reforzado y en planta curva, es decir, de tipo medio abanico, su operación es libre y tiene una capacidad de 400  $m^3/seg$ . La longitud de la cresta es de 39.47 m a la elevación 124.25 m, que corresponden a la cota 2044.85 m.s.n.m. (Fig.6).



Figura 6. Vertedor de cresta libre, presa Gonzalo N. Santos, S.L.P.

### 1.7.3 Niveles y capacidades del vaso

El embalse tiene una capacidad de almacenamiento de 8,300,000 m<sup>3</sup>; la elevación al NAMO (Nivel de Aguas Máximas Ordinarias) es de 124.25 m y al NAME (Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias) de 127.20 m, que corresponden a las cotas 2044.85 y 2047.80 m.s.n.m. respectivamente. En total, la presa cuenta con una superficie de 102 hectáreas (Fig.7).



Figura 7. a) Vista aérea del embalse; b) Vista general del embalse

### 1.7.4 Obra de toma

En la ladera derecha de la presa se ubica la obra de toma, constituida por un canal de acceso, una estructura de rejillas y un túnel de sección herradura revestido de mampostería y bóveda de concreto, tiene un diámetro de 2.20 m y 84.5 m de longitud. El túnel consta de un tubo-tapón, de 6 m de longitud del cual emergen dos tuberías de acero de 40.64 cm de diámetro, las cuales se encuentra a lo largo de todo el túnel, hasta donde se encuentra e inicia la cámara y casetas de operación de válvulas; las operaciones se realizan mediante dos válvulas de compuerta para



emergencias, instaladas inmediatamente aguas abajo del tapón en la entrada del túnel y dos del mismo tipo para servicio, instaladas en la caseta (Fig.8). El agua descarga aguas abajo a un canal revestido de sección trapezoidal con una longitud de 10 m y de ahí al cauce del río.

La obra tiene capacidad de diseño para un gasto de  $0.80 \text{ m}^3/\text{seg}$ , regularmente se opera con  $230 \text{ l/s}$  para alimentar la planta purificadora.

Como se mencionó en párrafos anteriores, en 1998 se aprovechó el desagüe del embalse para realizar una impermeabilización de la ladera cercana a esta toma. Por lo que se modificó la entrada de esta obra, y se optó por la construcción de una torrecilla de concreto reforzado, para evitar que el azolve penetre en la nueva estructura.



a)



b)

Figura 8. a) Caseta de operaciones de válvulas; b) Tuberías subterráneas

## 1.8 Marco Geológico

### 1.8.1 Geología Regional

El Estado de San Luis Potosí se ubica en la región centro-norte del territorio mexicano, en las coordenadas geográficas  $22^{\circ} 36' 12''$  N y  $100^{\circ} 25' 47''$  O, y se encuentra a una altitud de 1877 m.s.n.m. Sus colindancias son al noreste, con Nuevo León y Tamaulipas; al este, con Veracruz; al sur con Hidalgo, Querétaro y Guanajuato; y al oeste, con Zacatecas (Fig.9).

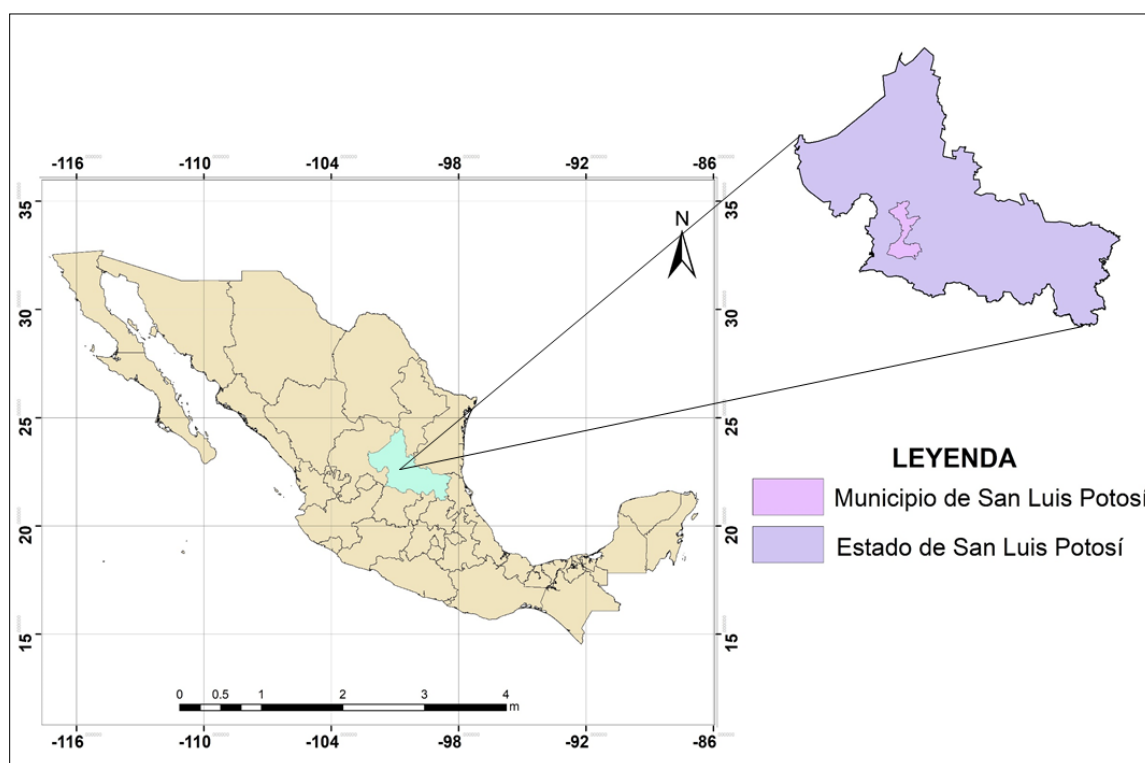


Figura 9. Ubicación del estado de San Luis Potosí

San Luis Potosí pertenece fisiográficamente a la provincia denominada Mesa Central (MC), la cual se extiende sobre una región semidesértica que se encuentra rodeada al norte y oriente por la Sierra Madre Oriental, al poniente con la Sierra

Madre Occidental, y en su parte meridional con la Faja Volcánica Trasmexicana. La provincia de la Mesa Central, cubre la mitad occidental del Estado, en donde existe una capa gruesa de rocas extrusivas, además de diversas características litológicas y estructurales los cuales indican los diferentes eventos geológicos y actividades volcánicas que actuaron en distintas épocas a lo largo de todo el estado, destacando entre ellas el Campo Volcánico San Luis Potosí (CVSLP).

El CVSLP se localiza al sureste de la Sierra Madre Occidental y cubre un área aproximada de 40,000 km<sup>2</sup> y se ha definido como complejo volcánico, en base al reconocimiento de un paquete de unidades volcánicas que se formaron desde el Eoceno al Cuaternario y es considerada como la provincia ignimbrítica más grande del mundo. Su basamento es una secuencia sedimentaria marina que cubre gran parte de la mitad occidental del estado, las cuales fueron depositadas en dos grandes provincias paleogeográficas; la Cuenca Mesozoica del Centro de México y la Plataforma Valles-San Luis Potosí (Tristán González *et al.* 2009).

La tectónica extensiva, que afecta la porción occidental de la Mesa Central fue un mecanismo importante para el emplazamiento de lavas y depósitos piroclásticos que fueron emitidos por diferentes complejos eruptivos del CVSLP. Estos complejos presentan variaciones geoquímicas importantes, caracterizándose por ser contemporáneos y co-magmáticos (Fig.10). Dicho vulcanismo dio inicio con la emisión de derrames de lava andesítica depositadas sobre sedimentos lacustres, posteriormente, se depositó un paquete de lavas y productos piroclásticos de composición intermedia a riolítica.

Para su mejor estudio, se realiza una separación de los complejos volcánicos del CVSLP de acuerdo a su correlación de unidades volcánicas, a su semejanza litológica-estructural, posición estratigráfica, análisis químicos y edades isotrópicas (Tristán González *et al.* 2009), en base a estos parámetros los complejos son:

- Complejo Volcánico Ahualulco (CVA) localizado al norte del CVSLP.
- Complejo Volcánico Pino (CVP) que se ubica en la porción poniente del CVSLP.
- Complejo Volcánico Villa Hidalgo (CVVH) y La Repartición (CVR) ubicados al nororiente del CVSLP.
- Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito (CVSSM) que conforma la mayor parte del CVSL.

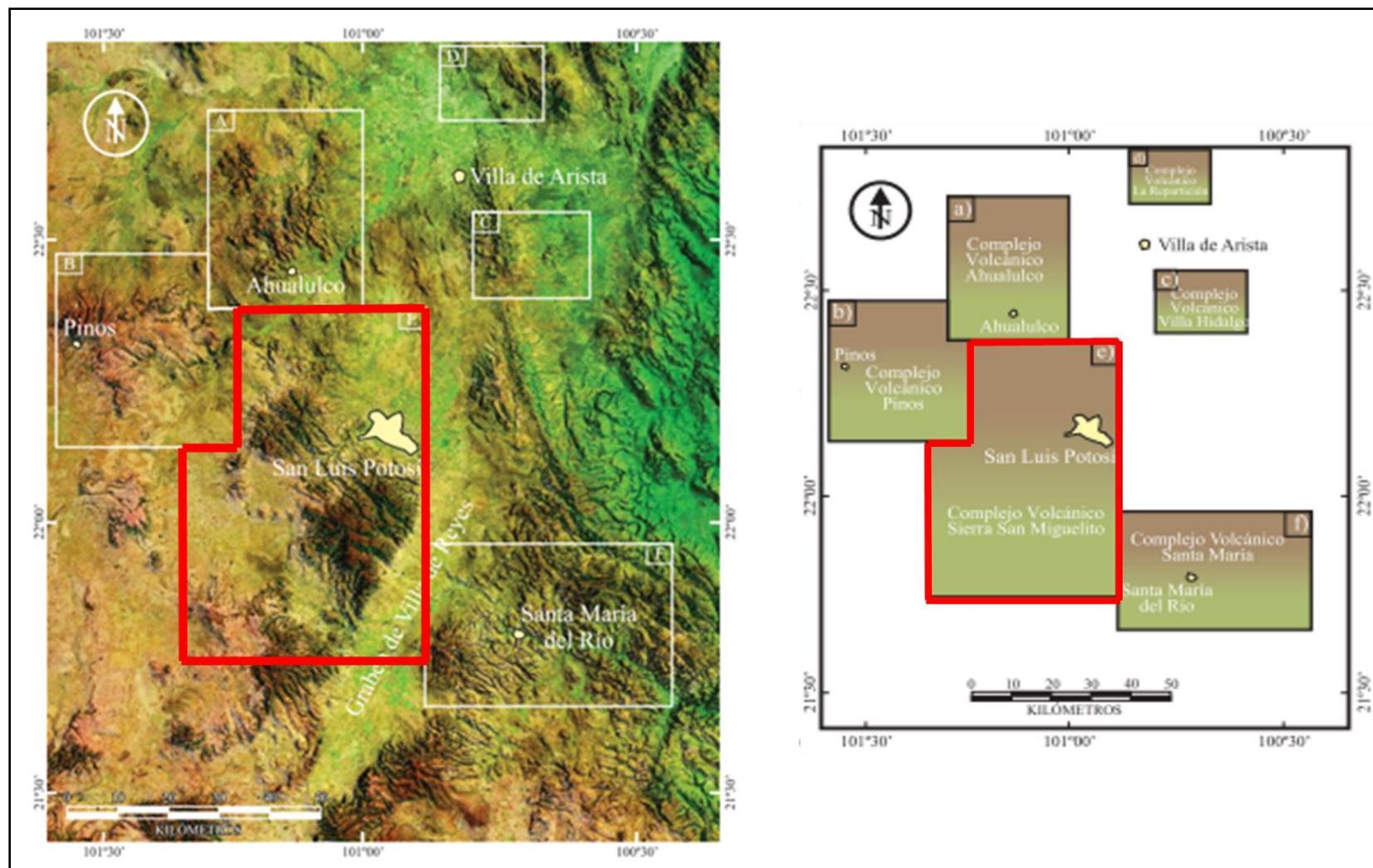


Figura 10. Ubicación de los Campos Volcánicos de San Luis Potosí (Tristán González et al. 2009)

La zona de estudio se localiza dentro de este último complejo (CVSSM), por lo que es importante señalar algunas de sus características más significativas, ya que estas pueden servir para caracterizar la geología local, además de entender ciertos procesos que pudieron haberse presentado en dicha zona y así entender lo que ocurre en la presa.

### **1.8.1.1 Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito**

El Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito (CVSSM) se localiza en los alrededores de la parte sur y occidente de la ciudad de San Luis Potosí, y su rasgo morfológico más importante lo constituye la Sierra de San Miguelito (Fig.11).

El CVSSM empezó a formarse con la emisión de las lavas de la riolita San Miguelito, formada de varios derrames episódicos, también se encuentran derrames piroclásticos de la ignimbríta Cantera e ignimbríta San José intercalados entre la riolita San Miguelito. Otro derrame piroclástico riolítico importante, es la riolita Panalillo descrita por Laberthe-Hernández y colaboradores (1982), la dividieron en dos miembros; el miembro Inferior que es un depósito de caída y flujos piroclásticos de color crema, con fragmentos de pómez y líticos. Mientras que el miembro Superior consiste de pómez y ceniza totalmente soldada.

La secuencia del CVSSM está formada por lavas e ignimbrítas de derrames de lava de composición riolítica que formaron domos exógenos. De manera aislada se observan depósitos piroclásticos separando los flujos de lava que forman los domos más grandes. La serie de domos se emplazaron siguiendo estructuras regionales de orientación NW-SE y algunos de ellos, sobre todo los de la porción poniente de este complejo siguieron un patrón semicircular (Tristán González *et al.* 2009).

Gran parte del volumen de rocas volcánicas del CVSSM lo forman los domos riolíticos San Miguelito y el Zapote, entre los cuales se encuentra intercalado un paquete grueso de depósitos de flujos piroclásticos pertenecientes a la ignimbríta Cantera y San José que se extienden en la mayor parte de la Sierra San Miguelito. Toda la secuencia de la Sierra San Miguelito se encuentra afectada por una gran cantidad de fallas normales con ángulo alto, que se acomodaron en patrón de domino y formaron fosas tectónicas estrechas que bascularon los bloques al NE.

La última actividad volcánica del CVSSM ocurrió en el Mioceno con la emisión de lavas que varían de basálticas, traquitas y riolíticas que fueron emitidas en un periodo de tiempo muy breve. En la figura 11 se puede observar la distribución del CVSSM con sus características geológicas y estructurales, además de la ubicación de la presa Gonzalo N. Santos.

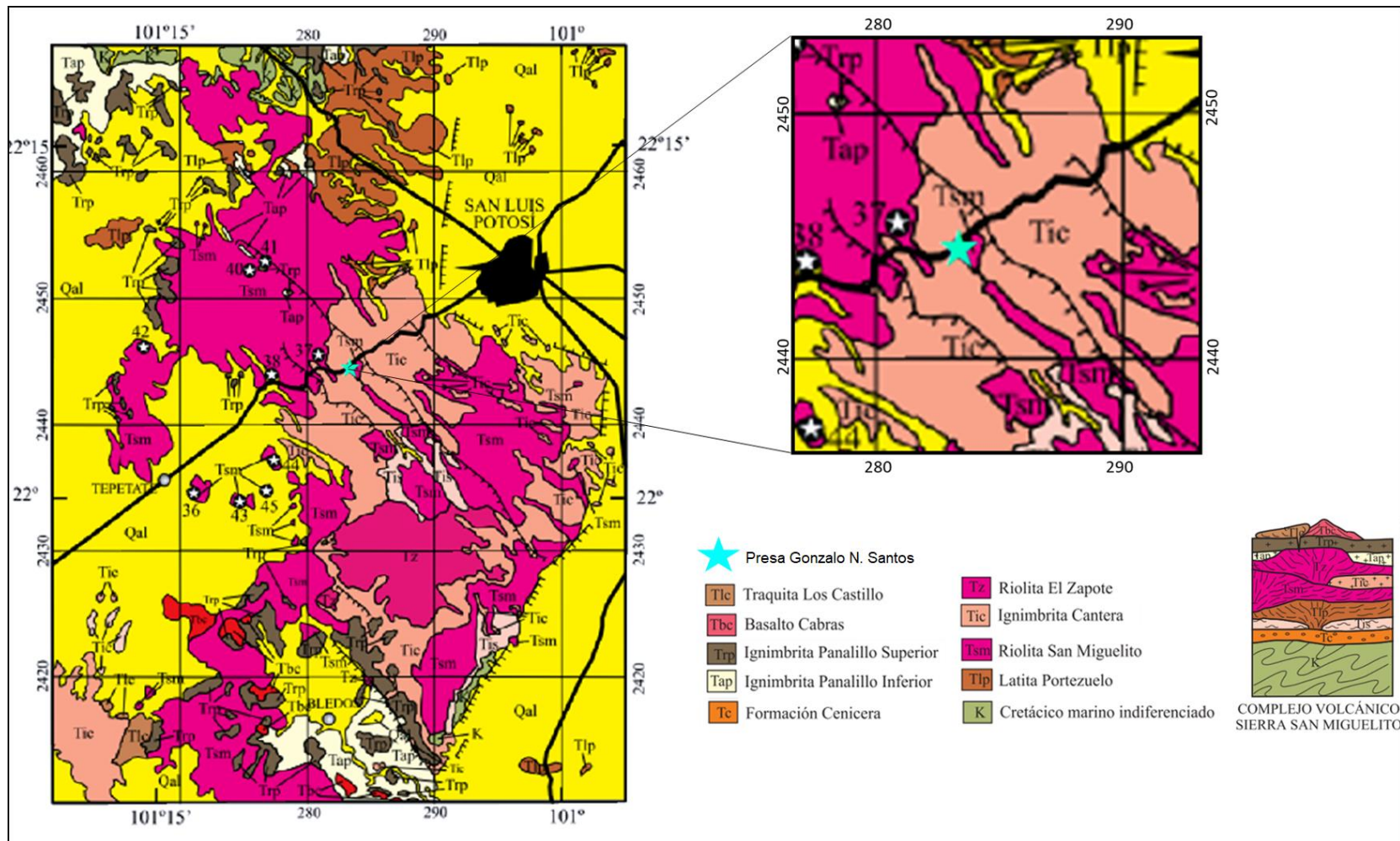


Figura 11. Ubicación del Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito y la ubicación de la presa Gonzalo N. Santos



## **1.8.2 Geología Local**

La presa Gonzalo N. Santos, se construyó sobre rocas de origen ígneo extrusivo ácido. Estudios previos determinaron que las rocas que se encuentran aflorando son principalmente las unidades denominadas como, La Ignimbrita Cantera, y Riolita, Tobas y vitrófidos. Es importante señalar, que tanto la Presa como dichas unidades forman parte del Campo Volcánico de San Luis Potosí, por lo que, su comportamiento y formación están relacionadas con los procesos volcánicos desarrollados en dicho complejo volcánico.

### **1.8.2.1 Ignimbríta Cantera**

La Ignimbrita Cantera aflora alrededor de la Sierra de San Miguelito en sus porciones central y sur. Originalmente fue descrita por Labarthe-Hernández y colaboradores (1982), considerando su localidad tipo en el arroyo de la Cantera, localizado a 2.3 km al NE del poblado de los Arroyos, en el estado de San Luis Potosí.

Es una unidad formada por flujos piroclásticos de pómez y ceniza de composición riolítica que contiene cristales de cuarzo, sanidino y plagioclasa. De igual forma, se pueden encontrar líticos de riolita y de arenisca del basamento pre-volcánico. Esta unidad sobreyace, de manera discordante a la Riolita San Miguelito y subyace de la misma forma a la Riolita El Zapote. (Labarthe *et al.* 1980).

Estos flujos piroclásticos se han dividido de acuerdo a su grado de soldamiento en; sin soldar y bien soldada.

### **1.8.2.2 Base sin soldar**

Consiste de un flujo de cenizas riolítico sin soldar, presenta un espesor entre 2 y 30 m, aparece de un color blanco a rosa masivo, sin estratificación ni gradación, con abundante pómez sin colapsar; además, presenta fenocristales de cuarzo, sanidino y biotita. Muestra líticos de areniscas en tonos verdosos y rojizos, y de rocas volcánicas en color café.

### **1.8.2.3 Ignimbrita Cantera Soldada**

Es una zona de transición que comienza con una región delgada parcialmente soldada a una secuencia de flujo de cenizas bien soldadas. Consisten de una roca de color gris rosáceo a café grisáceo. Presenta desvitrificación en los granos más gruesos, alrededor de algunos fenocristales y dentro de algunos fragmentos de pómez colapsada.

A pesar de la clasificación anterior, Labarthe-Hernández y colaboradores (1982), agruparon en 4 miembros a la Ignimbrita Cantera, según las características físicas que presento en la localidad de Cerro Alto (Maldonado, 1997):

- El primer miembro, es la base de la formación, se presenta con una base superior brechosa (vitrificado) de color negro, densamente soldado y vítreo.
- El miembro dos, es un horizonte rosa claro, parcialmente soldado, con pómez sin colapsar, parcialmente vítreo y en su parte superior con algunas cavidades con fase de vapor.
- El miembro tres, es un afloramiento de roca color café claro, presenta estructura columnar, soldado denso y con pómez colapsada, es vitrificada.

- El último miembro es una toba depositada por aire, color rosa, con soldamiento parcial y pómez sin colapsar.

Todas estas unidades presentan en mayor o menor proporción fenocristales de sanidino y cuarzo. Esta unidad se encuentra aflorando en mayor proporción en toda la zona de estudio.

#### **1.8.2.4 Riolita San Miguelito**

De manera similar, esta unidad también fue descrita inicialmente por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978), quienes consideraron su localidad tipo en la ramificación norte de la Sierra de San Miguelito, bordeando al valle de la ciudad de San Luis Potosí (Maldonado, 1997).

Esta unidad se formó de lavas ricas en fenocristales de sanidino y cuarzo en proporciones iguales. Los distintos flujos de lava presentan cierta foliación, un desarrollo de brechas de desintegración en la base y vitrofido en la cima.

Posteriormente, Labarthe-Hernández y Jiménez-López (1992) dividieron esta formación en cuatro unidades localizadas de la base a la cima de la siguiente manera: tefra basal, brecha de desintegración, riolita desvitrificada central y caparazón; de las cuales las últimas dos se encuentra en el área de interés, y las cuales serán descritas para su mejor conocimiento.

### **1.8.2.5 Riolita desvitrificada central**

Son flujos de lava riolíticos que consisten en una roca de color gris claro a gris rosáceo, tienen una textura holo a microcristalina, porfirítica, con matriz afanítica, además, contienen fenocristales de sanidino y cuarzo, ambos en proporciones iguales. La matriz está totalmente desvitrificada y donde se puede apreciar esferulitas grandes y diminutas.

### **1.8.2.6 Caparazón**

De forma transicional sobre la riolita desvitrificada central, aparece la unidad el caparazón, la cual consiste de una mezcla de materiales piroclásticos y vitrovido negro o gris oscuro. La tefra contiene flujos de ceniza sin soldar, masivos, sin gradación ni estratificación, de grano fino, presenta numerosos lentes y horizontes de vitrovido.

En la presa Gonzalo N. Santos, existen horizontes de riolita desvitrificada y pequeños domos de riolita fluidal desvitrificada. De igual forma, existen cavidades grandes y alargadas con depósitos de calcedonia y óxidos de hierro. Al norte de la presa, existe una capa de 80 cm de espesor, que consiste de una toba fina de color rosa con pómez sin colapsar, con gradación inversa y en su cima presenta ceniza fina laminar.

En la figura 12 se puede observar la distribución de las dos unidades que conforman la geología local alrededor de la presa Gonzalo N. Santos, además de incluir las principales fallas que se presentan en el área de estudio, observándose un patrón de orientación NW-SE, tanto de manera regional como local.

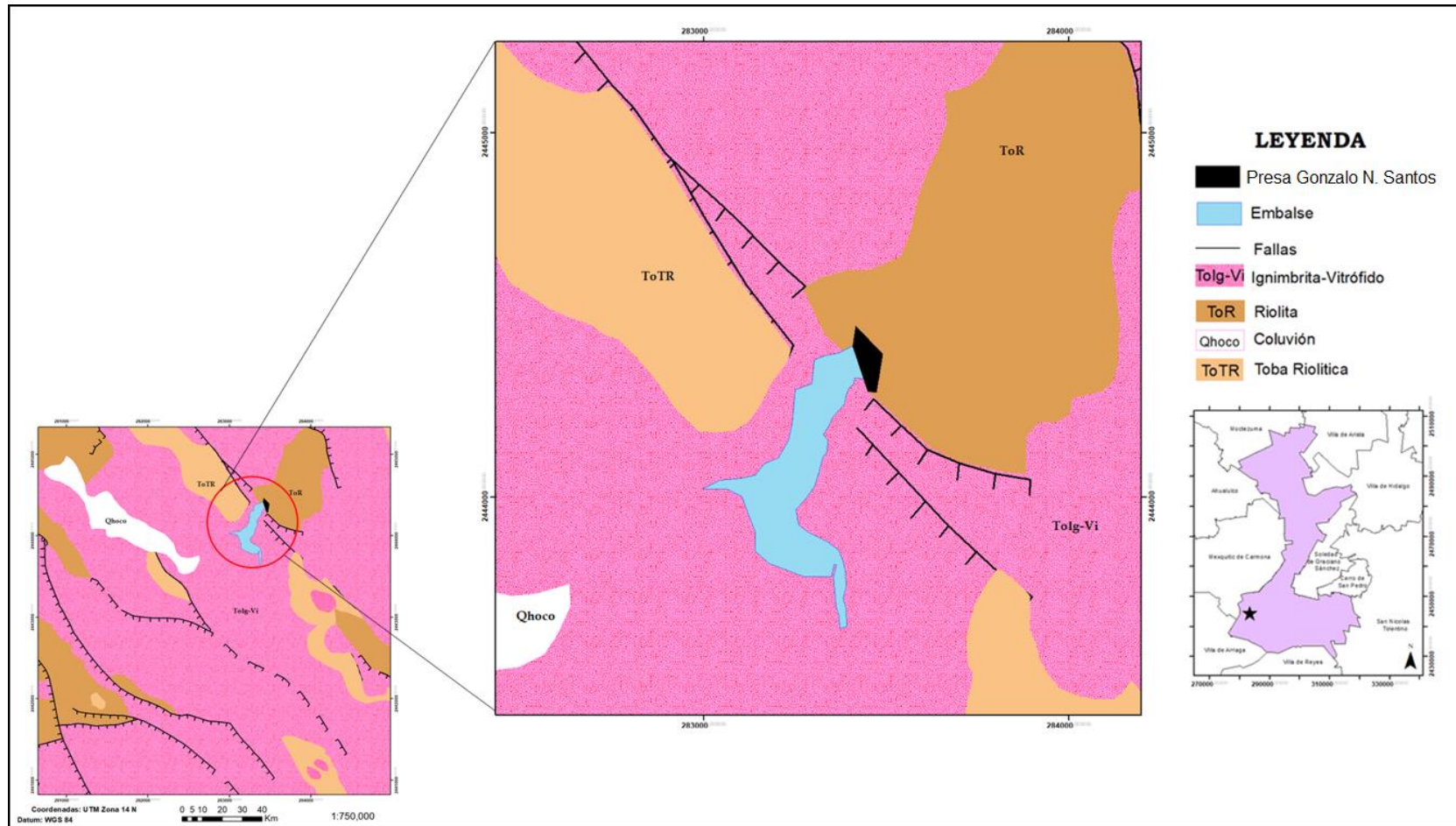


Figura 12. Geología local y estructural de la presa Gonzalo N. Santos

Con la imagen anterior podemos determinar que las obras se distribuyen sobre las dos formaciones geológicas mencionadas anteriormente. Dicho lo anterior, podemos indicar que el embalse se encuentra en su totalidad dentro de la unidad Ignimbrita Cantera, la cual se encuentra muy asociada a la Riolita San Miguelito. En esta porción se presentan varios flujos de cenizas que van desde bien soldados hasta sin soldar, generalmente separados por vitrificados y tobas depositadas por aire.

Por el contrario, las zonas del extremo de la cortina, corresponde a la riolita San Miguelito, donde se observa una roca de color rosado muy brechada con abundantes geodas y zonas de vitrificado. Muy cercano a la zona de la boquilla se localiza el contacto con la Ignimbrita de color rosado, clasificada como Ignimbrita Cantera.

## **Capítulo 2. Marco Teórico**

### **Introducción**

Los métodos eléctricos también conocidos como métodos geoelectricos tienen su fundamento en el análisis de una respuesta que el suelo genera gracias a un estímulo eléctrico que se forma de manera artificial o natural. Al utilizar estos métodos se deben conocer las propiedades eléctricas que poseen las rocas que se encuentran en la zona de estudio. Dichas propiedades pueden ser tanto físicas como químicas, entre ellas destacan la agregación de sus minerales, la forma, el volumen y el relleno de sus poros.

El estímulo eléctrico se propaga a través de corrientes eléctricas que se distribuyen sobre las rocas. Estas corrientes obedecen a la ley física llamada Ley de Ohm y se analizan considerando un medio tridimensional e isotrópico.

En este capítulo se muestran las bases teóricas de los métodos eléctricos utilizados en el presente trabajo de tesis.

### **2.1 Resistividad Eléctrica**

Las propiedades electromagnéticas principales que caracterizan a las rocas son: la permitividad eléctrica, permeabilidad magnética, y la resistividad o su inverso la conductividad eléctrica. De todas ellas la más utilizada en la aplicación de estudios geoelectricos de bajas frecuencias es la resistividad, debido a la poca presencia de minerales ferromagnéticos contenidos en la roca (El, 1972). La resistividad eléctrica

específica ( $\rho$ ) es la propiedad que presenta cualquier material de oponerse al paso de una corriente eléctrica, y se expresa matemáticamente como:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} \quad (1)$$

Donde

$\rho$ : resistividad eléctrica

$R$ = es la resistencia del material

$A$ = área del material

$l$ =longitud del material

## 2.2 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica, es la magnitud inversa de la resistividad eléctrica, y se define como la capacidad que presentan algunos materiales para transmitir una corriente eléctrica cuando es aplicado un voltaje, y cuya expresión es:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma$ : conductividad eléctrica

$\rho$ : resistividad eléctrica

En algunas rocas y minerales la conductividad eléctrica puede darse de las siguientes formas:



- **Electrónica;** donde la forma normal del flujo de corriente en materiales posee electrones libres.
- **Electrolítica;** se genera cuando el agua presente en los poros tiene sal en solución.
- **Conducción dieléctrica;** se desarrolla en conductores pobres o aislados bajo la presencia de un campo eléctrico variable.

La mayoría de las rocas no son buenas conductoras de corriente eléctrica debido a que sus minerales formadores tampoco lo son; sin embargo, la presencia de poros y fracturas tiene como resultado que los valores de conductividad se incrementen. Generalmente, la conductividad eléctrica de una roca se lleva a cabo por procesos electrolíticos debido a que sus poros y fracturas contienen algún porcentaje de agua, la conducción dependerá de la cantidad de agua presente, así como de la salinidad y distribución en la roca almacén.

En una roca la conductividad dependerá de la permeabilidad, número de poros, dimensión e interconexión, el grado de humedad, la concentración de electrolitos disueltos, temperatura y fase en que se encuentra el agua de poro.

Existen diversos factores que intervienen en la variación tanto de la resistividad como de la conductividad, gracias al conocimiento de estos parámetros es posible interpretar la diversidad de estas magnitudes en un medio en base a sus características. Los factores que intervienen y modifican la conductividad eléctrica (o su inverso la resistividad) son:

- Resistencia eléctrica de los minerales que conforman la roca

- Porosidad
- Grado de humedad
- Resistividad de los fluidos contenidos en los poros de las rocas
- Doble capa eléctrica
- Capacidad de intercambio catiónico
- Temperatura

Como se afirmó, existen diversos procesos que se presentan en las rocas y uno de los más importantes son los procesos químicos-eléctricos, que la alteran y que pueden llegar a afectar sus valores de resistividad. A continuación, se describe el proceso considerado el más importante para el desarrollo de este estudio.

### **2.3 Doble Capa Eléctrica**

Es un fenómeno que ocurre al entrar en contacto la parte sólida de la roca con el fluido o solución presente dentro de la misma. Al establecerse dicho contacto entre ambas fases, se genera una diferencia de potencial que origina la atracción entre los iones contenidos en la solución y los iones presentes en la base sólida, generando una nube de cargas eléctricas próximas a la interface (EI, 1972), originándose lo que se conoce como Doble Capa Eléctrica (DCE).

El tamaño de la DCE varía entre algunos nanómetros y micrómetros, dependiendo de la composición de la solución y de las características de la roca, siendo máximos en las arcillas debido a las propiedades de sus minerales y el diámetro de sus capilares, es por ello, que existen diversos tipos de arcillas y por lo tanto diferentes magnitudes de DCE. Otro factor que debe considerarse es la salinidad del fluido

que rellena los poros de la roca, ya que el espesor de la DCE disminuye conforme la salinidad aumenta. Se dice que cuando la salinidad es alta, la influencia de la DCE es despreciable y el contraste de resistividad entre arena y arcilla disminuye considerablemente.

Para caracterizar la DCE se cuantifican las fuerzas de interacción electrostática entre una superficie y los iones de los electrolitos, lográndose esto a partir de determinaciones electrocinéticas de potencial. El hecho de llegar a cuantificar las fuerzas de interacción electrostática entre la superficie y los iones electrolíticos que la rodean es el fin que se persigue en los estudios geofísicos de potencial espontáneo de origen electrocinéticos.

Una de las principales cuestiones que se han investigado de la DCE es la distribución de las cargas en solución en los alrededores de la superficie cargada, ya que esta distribución determina en qué forma el potencial electrocinético cambia con la distancia a la superficie del sólido.

La primera teoría que apareció para explicar dicha distribución fue la de Helmholtz (1879), donde se consideró que en la interface sólido-líquido, los iones de carga opuesta a la superficie se distribuyen paralelamente delante de ella y como consecuencia, aparecen dos capas cargadas y de signo contrario.

En 1913, el modelo mencionado fue invalidado por Gouy y por Chapman, ambos autores indicaban que la segunda capa de Helmholtz no estaba constituida por iones del mismo signo, debido a la agitación térmica que destruía la colocación ordenada y rígida de los iones en la interface. Estos autores consideraron una

distribución teórica de los iones opuestos en forma de capa difusa, en la que coexistían los iones de signos opuestos, este modelo es conocido como la capa difusa de Gouy-Chapman.

En 1924 Stern estudió las diferentes dificultades que tenían ambos modelos, por lo que combinó la doble capa rígida (Helmholtz) con la difusa (Gouy-Chapman); Stern supuso que la distribución de iones debe estar ligada fuertemente por las fuerzas intermoleculares existentes entre estos iones y la superficie. Por estudios de adsorción se conoce que las fuerzas de atracción entre los iones en disolución y una superficie cargada son muy grandes y disminuyen fuertemente con la distancia, por lo que no es de extrañar que se forme una monocapa de iones fuertemente adheridos a la superficie y el resto forme una capa difusa (Carrión, 1986).

En el modelo de DCE de Stern, se presentan dos tipos de potenciales; el potencial de superficie, y el potencial de Stern ( $\zeta$ ), también conocido como potencial zeta, que es la diferencia de potencial entre el extremo de la capa fija a la superficie y cualquier otro punto de la solución de electrolito sin influencias eléctricas de la superficie. Su valor puede ser del mismo signo o contrario a la superficie y está en función del espesor de la capa fija a la superficie del sólido.

Dicho potencial es una medida de la estabilidad de una partícula e indica el potencial que se requiere para penetrar la capa de iones circundante en la partícula para desestabilizarla, por lo tanto, se puede decir que el potencial zeta es la potencia electrostática que existe entre la separación de las capas que rodean a la partícula, por lo que su cálculo es importante para conocer el potencial que se presenta (Sandoval, s/f).

Actualmente, la mayor parte del conocimiento que poseemos sobre la DCE proviene del estudio de los fenómenos electrocinéticos, que ocurren cuando las dos fuerzas lo generan, el sólido y la solución del electrolito, se mueven una respecto a la otra.

## 2.4 Resistividad Aparente

El subsuelo no consta de capas homogéneas, por lo que la homogeneidad lateral es difícil de esperar, por ello en la prospección geofísica se trabaja con el concepto de resistividad aparente  $\rho_a$ .

Se define a la resistividad aparente en un semi-espacio homogéneo con heterogeneidades donde las lecturas cambian de una posición a otra obteniendo una  $\rho$  diferente a la del semi-espacio homogéneo. Esta variable es el valor de medición individual que se asocia al punto debajo del arreglo de electrodos y es función del espaciamiento de los electrodos y de la distribución real de la  $\rho$  (Díaz Anaya, 2010).

En rocas ígneas y metamórficas se presentan valores altos de resistividad, la cual puede disminuir en dependencia del grado de fracturación y del porcentaje de agua que rellena las fracturas del terreno. Por otro lado, las rocas sedimentarias son más porosas y tienen alto contenido de agua, por lo que sus valores de resistividad son bajos; sin embargo, los suelos arcillosos saturados tienen generalmente valores aún más bajos de resistividad. Los suelos arcillosos tienen valores de resistividad más bajos que los suelos arenosos.

Iakubovskii y Liajov (1980) describieron la ecuación general de la resistividad aparente como:

$$\rho_a = k \frac{\Delta U}{I} \quad (3)$$

Donde:

$\rho_a$ : resistividad aparente

$k$ : factor geométrico

$\Delta U$ : diferencia de potencial

$I$ : intensidad de corriente

La cual nos indica que la resistividad aparente no depende de la intensidad de corriente ( $I$ ) que se envía al terreno, ya que la variación de corriente origina otra variación proporcional a la diferencia de potencial ( $\Delta U$ ). Esta variable no es el promedio de los valores de resistividad ( $\rho$ ) obtenidos del subsuelo, sino que cada valor de resistividad aparente ( $\rho_a$ ) es una medición individual que se asocia al punto inmediatamente debajo del centro del arreglo empleado y de la distribución real de la resistividad ( $\rho$ ).

En el caso particular de un medio homogéneo, la resistividad aparente coincide con la resistividad verdadera  $\rho_a = \rho$ . Esto no se presenta en el subsuelo, debido a que el suelo no consta de capas homogéneas verticales ni laterales (Fig.13).

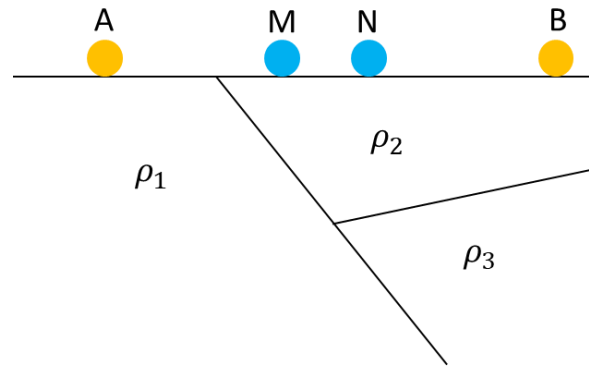


Figura 13. Ejemplo de un medio heterogéneo en el subsuelo

## 2.5 Propiedades Eléctricas de los Materiales Terrestres

Los flujos de corriente que se presentan en los materiales terrestres a profundidades someras se producen debido a dos efectos principales; la conducción electrónica y la conducción electrolítica. En la primera, el flujo de corriente es por medio de electrones libres, mientras que, en la conducción electrolítica, el flujo de corriente es a través del movimiento de iones en el agua de poro.

En los estudios de ingeniería y ambientales la conducción electrolítica es el mecanismo más común, mientras que la conducción electrónica es importante cuando existen minerales conductivos, como los que se presentan a continuación:

- **Metales:** en los metales como Oro (Au), Plata (Ag), Cobre (Cu), Estaño (Sn) y grafito, presentan enlaces metálicos con gran movilidad de electrones, la conducción metálica no es importante a una escala macroscópica, dado que la proporción de metales nativos es muy baja, prevaleciendo la resistividad de las impurezas que es más alta.
- **Semi-conductores:** en este tipo de materiales no existe tanta facilidad para el movimiento de los electrones, por lo que se necesita la presencia de

campos eléctricos fuertes que produzcan la conducción. La conductividad de estos semi-conductores aumenta con la temperatura y con el contenido de impurezas. Algunos son la bornita, magnetita, pirita, etc.

- **Dieléctricos:** son materiales como las micas, los feldespatos, cuarzo, calcita y silicatos en general, cuyos electrones están fuertemente ligados a los átomos mediante enlaces covalentes o iónicos.
- **Electrolitos líquidos (soluciones salinas):** en las soluciones acuosas los portadores de la corriente eléctrica son los cationes y aniones; al aplicar un campo eléctrico los iones presentes se desplazan en la dirección de las cargas opuestas neutralizando la polarización del medio.

La resistividad de algunos minerales, rocas, químicos, aguas, materiales de suelo y contaminantes se presentan en la Tabla 1.



Tabla 1. Valores de resistividad de rocas, minerales, aguas, sedimentos químicos, minerales y materiales (Tomada de Díaz Anaya, 2010)

Rocas ígneas y metamórficas	Resistividad ( $\Omega\cdot m$ )	Rocas sedimentarias	Resistividad ( $\Omega\cdot m$ )
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$
Granito alterado	1500-10000	Lutita	$20 - 2 \times 10^3$
Granito muy alterado	100-600	Caliza	$100 - 5 \times 10^3$
Basalto	$10 - 1.3 \times 10^7$	Caliza compacta	1000-5000
Ande sita	$4.5 \times 10^4 - 1.7 \times 10^2$	Caliza blanda	100-300
Diorita	$10^5$	Caliza fracturada	500-1000
Gabro	$10^3 - 10^6$	Limonita	$50 - 10^7$
Sienita	$10^2 - 10^6$	Dolomita	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Peridotita	$3 \times 10^3 - 6.5 \times 10^3$	Margas secas	$10^2$
Lavas	$10^2 - 5 \times 10^4$	Margas húmedas	10
Pizarra	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$		
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$		
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$		

Aguas, sedimentos y suelos	Resistividad ( $\Omega\cdot m$ )	Químicos, minerales y materiales	Resistividad ( $\Omega\cdot m$ )
Arenas	30-500	Hierro	$9.74 \times 10^{-8}$
Arena fina	$10^3$	0.01M cloruro de potasio	0.708
Arena seca	$10^3 - 10^4$	0.01M cloruro de sodio	0.843
Arena silícea	200-3000	0.01M ácido acético	6.13
Arenas con agua dulce	50-500	Xileno	$6.998 \times 10^{16}$
Arenas con agua salada	0.5-5	Aluminio	$2.65 \times 10^{-8}$
Arena Petrolífera	$4 - 2.2 \times 10^2$	Mercurio	$95.8 \times 10^{-8}$
Arcilla	1-100	Madera	$10^8 - 10^{11}$
Arcilla seca	30	Vidrio	$10^{10} - 10^{14}$
Arcilla húmeda	10	Ámbar	$5 \times 10^{14}$
Limos	10-200	Plata	$1.47 \times 10^{-8}$
Aluvi6n	10-800	Cobre	$1.70 \times 10^{-8}$
Gravas	$50 - 10^3$	Oro	$2.22 \times 10^{-8}$
Gravas húmedas	$5 \times 10^2$	Acero	$20.0 \times 10^{-8}$
Gravas saturadas	102	Platino	$11.0 \times 10^{-8}$
Conglomerado	$2 \times 10^3 - 10^4$	Tungsteno	$5.25 \times 10^{-8}$
Roca salada	$3 \times 10 - 10^{13}$	Níquel	$6.40 \times 10^{-8}$
Aguas dulces superficiales	$10 - 10^3$	Estaño	$1.5 \times 10^{-8}$
Aguas salobres superficiales	2-10	Plomo	$22.0 \times 10^{-8}$
Agua subterránea (no contaminada)	10-100	Cromo	$13.2 \times 10^{-8}$
Agua marina	0.2	Calcopirita	$1.2 \times 10^{-5} - 0.3$
Agua de lagos salados	0.1-1	Pirita	$2.9 \times 10^{-5} - 1.5$
		Pirrotita	$6.5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-2}$
		Cinabrio	$2 \times 10^7$
		Galena	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2$
		Cobalto	$3.5 \times 10^{-4} - 10^{-1}$
		Bauxita	$2 \times 10^2 - 6 \times 10^3$
		Cuprita	$10^{-3} - 300$
		Cromita	$1 - 10^6$
		Hematita	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$
		Magnetita	$5 \times 10^{-3} - 5.7 \times 10^3$
		Cuarzo	$7.5 \times 10^{17}$
		Azufre	$10^{15}$
		Carb6n	$3.5 \times 10^{-5}$
		Anhidrita	$10^9$
		Calcita	$2 \times 10^{12}$
		Fluorita	$8 \times 10^{13}$
		Yeso	1000
		Grafito	$60.00 \times 10^{-8}$
		Silicio	$6.40 \times 10^2$

## 2.6 Métodos Geofísicos

Los métodos de prospección eléctrica se basan en el estudio de campos de potencial eléctrico, tanto naturales como artificiales. Mediante estas mediciones se pueden determinar algunas características del subsuelo, como reconocer estructuras geológicas, determinar contaminantes, flujos u objetos enterrados, entre otros.

Desde sus inicios, estos métodos se han aplicado principalmente en la exploración minera, pero hoy en día sus aplicaciones son variadas como exploración de agua subterránea, en la ingeniería civil para la determinación de la roca firme, presas, túneles, localización de fugas de agua en cuerpos de presas, prospecciones petrolíferas, e incluso en investigación de puertos.

Una de las ventajas que tienen los métodos eléctricos es el poder de controlar la profundidad de penetración, lo que permite que su utilización sea variada. Desde el punto de vista económico, los métodos eléctricos son de costo reducido tanto en la instrumentación como en el trabajo de campo, ya que se puede llegar a cubrir grandes extensiones de terreno en un tiempo reducido y por un costo muy bajo.

Los métodos eléctricos para su mejor empleo y manejo se dividen en tres grupos principales; *autopotenciales*, *potenciales*, y *electromagnéticos* (Cantos, 1987). El método de autopotencial o polarización espontánea se forma por un fenómeno de polarización electroquímica; por otro lado, los métodos de potencial son aquellos en los que se emplean electrodos para enviar corriente al terreno y así determinar las variaciones que se presenten cuando la corriente eléctrica entra en contacto con el terreno. Por último, los métodos electromagnéticos están basados en medir las

variaciones del campo electromagnético formado en el terreno por distintos procesos en general de manera inductiva.

Aunado a ello, existen diversas configuraciones para dichos métodos, la diferencia entre los distintos arreglos radica en el tipo de transmisor y receptor de corriente utilizados, y en cómo se sitúan en el campo estos transmisores y receptores.

Las técnicas de prospección eléctrica y electromagnética utilizadas en la presa Gonzalo N. Santos para determinar la existencia de flujos de agua en la cortina son:

- 1) Potencial Espontáneo
  - a. Superficial
  - b. Sobre el fondo de la presa
- 2) Perfilaje Electromagnético
  - a. Slingram
    1. Vertical
- 3) Tomografía Eléctrica
  - a. Polo-Dipolo
  - b. Dipolo-Dipolo
  - c. Wenner

A continuación, se describen de manera más detallada los métodos mencionados anteriormente.

### 2.6.1 Potencial Espontáneo

El método de potencial espontáneo (PE) es uno de los más antiguos y simples en la prospección geofísica pasiva. La técnica fue generalizada en la década de los 80 y principios de los 90, y fue empleada por primera vez por Robert Fox, cuyo trabajo consistió en detectar depósitos subterráneos de sulfuro de cobre en el condado de Cornwall, Inglaterra en 1830.

El principio del potencial espontáneo se basa en medir los potenciales naturales desarrollados en la tierra por acciones electroquímicas entre minerales y fluidos subsuperficiales o por un proceso electrocinético donde se involucran fluidos iónicos.

A lo largo de la historia, el método de potencial espontáneo se ha utilizado en diferentes áreas como la exploración minera (Sato y Mooney, 1960, Lögn y Bolviken, 1974, Corry, 1985), hidrogeología (Rao, 1953, Bogoslovsky y Ogilvy, 1974, Schiavone y Quarto, 1984), ingeniería y geofísica ambiental (Bogoslovsky y Ogilvy, 1977; Corwin, 1990), filtración de presas y terraplenes (Ogilvy et al., 1969, Bogoslovsky y Ogilvy, 1970, Butler, 1984;) y estudios geotérmicos (Corwin y Hoover, 1979). Además en estudios relacionados con detección y monitorización de filtraciones o fugas de lixiviados en vertederos urbanos (Meju, 2000), seguimiento de los lixiviados ácidos en balsas mineras de lodos (Campbell y Fitterman, 2000) y filtraciones de embalse (Martínez *et al.* 2003).

Dentro de todas estas múltiples aplicaciones las más utilizadas se encuentran en las áreas de la geotermia, ingeniería y ambiental; las cuales se enfocan a definir

fuentes asociadas con el flujo térmico y aguas subterráneas. Simultáneamente a estas aplicaciones, el método PE se ha utilizado en el mapeo de flujos de filtraciones en estructuras de contención como presas, diques, suelos de embalse, etc., y en el mapeo de patrones de flujo en las proximidades de deslizamientos de tierra, sumideros, pozos, túneles y fallas.

La información que proporciona este método es adecuada para conocer el estado de las estructuras o revestimientos ante posibles rupturas, cortes accidentales o perforaciones; junto a una monitorización periódica permite la detección de fugas de forma fiable y con anticipación, que pueda llegar a ser reparadas y así evitar daños en estructuras civiles e incluso en la población.

### ***2.6.1.1 Origen del potencial espontáneo***

El potencial espontáneo se genera mediante diversos procesos electroquímicos, dichos mecanismos no se comprenden en su totalidad, ya que las diferentes fuentes que lo originan causan dificultades al momento de la interpretación; además de que no existe una forma de separar una anomalía de PE en función de su origen electroquímico. Es por ello, que las medidas de interés están definidas por las fuentes de la anomalía y otras llamadas ruido.

Los mecanismos principales involucrados en el PE se describen a continuación:

#### ***2.6.1.1.1 Potencial de electrofiltración***

Los potenciales de electrofiltración (también conocidos como potenciales electrocinéticos o de transmisión), surgen cuando un fluido pasa a través de un

medio poroso, como arena, rocas fracturadas, basaltos, etc., esto genera que al existir una adsorción preferencial de cargas con la misma polaridad en la superficie de los granos se genere una capa fija, como respuesta a este fenómeno se produce otra capa móvil formada por el enriquecimiento del flujo intersticial. Estas dos capas que se forman se conocen como la doble capa eléctrica (Mainali, 2006).

### **2.6.1.1.2 Potenciales minerales**

Los potenciales minerales son quizás la causa más común de fuertes anomalías de PE locales. Los potenciales minerales se manifiestan en todo tipo de cuerpos minerales conductores de la electricidad y son casi invariablemente negativos.

El origen de los potenciales minerales no está descrito totalmente, sin embargo, se han desarrollado varias teorías para tratar de explicar dicho fenómeno, algunas atribuían el potencial de mineralización a la oxidación de partes del cuerpo mineral por encima del nivel freático. Más tarde, Sato y Mooney (1960) desarrollaron un modelo donde los electrones se pierden en la parte inferior del cuerpo del mineral y se ganan en la parte superior, debido a posibles reacciones químicas ocasionando que el mineral actúe como un conductor de electrones. Un problema con esta teoría es que no puede existir flujo de corriente en equilibrio químico. Esto solo puede ocurrir si no hay un flujo de corriente, por lo que no se registraría ninguna anomalía de PE. Con ello, se puede concluir que, los voltajes medidos en la interfaz dependen tanto de las reacciones químicas involucradas como de la distribución de resistividad subsuperficial.

### **2.6.1.1.3 Potenciales de difusión**

El potencial de difusión se debe a las diferencias que existen entre la movilidad de los iones en las soluciones de diferente concentración. La migración de los iones en la dirección del gradiente de concentración constituiría una corriente eléctrica, esta corriente de conducción crea una caída de potencial eléctrico que es la anomalía del potencial de difusión medida.

Se ha llegado a determinar que las diferentes concentraciones que se encuentran en las aguas subterráneas pueden contribuir a los potenciales de fondo encontrados en la mayoría de las investigaciones de PE; sin embargo, su influencia puede ser muy difícil de determinar, debido a que si la concentración de electrolitos en el suelo varía localmente, las anomalías del PE de fondo serán medidas en milivoltios o hasta decenas de milivoltios (Mainali, 2006). Dichas anomalías deberían desaparecer en ausencia de concentración en el suelo, ya que el flujo de iones crea un estado en equilibrio, pero en realidad parece que la diferencia de concentración ocurre todo el tiempo. El fenómeno no se comprende del todo, pero se sugiere que las diferencias de concentración se regeneren mediante reacciones redox que involucren oxígeno de la atmósfera.

### **2.6.1.1.4 Potenciales de sedimentación**

Los potenciales de sedimentación son el resultado de los mecanismos generadores de los potenciales de transmisión, en este caso, las partículas sólidas se mueven con respecto a un líquido que está estacionario como un todo. Los potenciales de sedimentación podrían ocurrir cuando hay cuerpos de agua estancada con altas

concentraciones de sedimentos suspendidos; sin embargo, las condiciones físicas requeridas para generar anomalías de PE significativas raramente existen en la naturaleza.

#### **2.6.1.1.5 Potenciales de adsorción**

Las anomalías de PE generadas por la adsorción de iones, se producen por encima de los cuerpos de granito de cuarzo y pegmatita, sin embargo, el mecanismo electroquímico no es claro. Las anomalías de PE observadas en depósitos de arcilla probablemente pertenezcan a esta categoría.

#### **2.6.1.1.6 Potenciales termoeléctricos**

Generalmente estas anomalías se generan mediante un enlace electrocinético y termoeléctrico. En el lado electrocinético, los potenciales de transmisión se crean cuando las fuentes térmicas inducen la convección del agua subterránea. Mientras que el efecto termoeléctrico se cree que involucra las tasas de difusión diferencial de ambos iones en el agua subterránea y los electrones e iones en el suelo y la roca. La magnitud de este efecto de acoplamiento termoeléctrico se expresa generalmente como una relación entre el gradiente de potencial eléctrico resultante y la diferencia de temperatura. Esta relación se llama coeficiente de acoplamiento termoeléctrico.

#### **2.6.1.1.7 Otras fuentes de potenciales**

La presencia de vegetación en el suelo puede conducir a anomalías de potencial, debido a su efecto sobre el contenido de humedad del suelo y la contribución de



potenciales de transmisión. Incluso es posible que los potenciales de difusión ocurran alrededor de las raíces de las plantas. También se ha observado que las áreas de vegetación densa tienden a dar valores de PE positivos en comparación con las áreas de suelo desnudo. Cambios geohidráulicos, la precipitación y el deshielo de nieve derretida típicamente influirán en la magnitud de las anomalías del PE debido a los potenciales de transmisión.

Fuentes de ruido artificial como maquinaria eléctrica y líneas de energía con conexión a tierra, carcasa metálica enterrada, tuberías, que en todos los casos falsifican los potenciales normales. Las derivas temporales que se producen por los cambios de temperatura en el electrodo, la humedad y las fluctuaciones químicas en el suelo también pueden afectar al PE.

La distribución de la resistividad en el suelo juega un papel muy importante en la medición de cualquier anomalía PE, estas anomalías son causadas por uno o más de los mecanismos electroquímicos descritos anteriormente, y cada uno de estos mecanismos se puede considerar como una fuente de corriente eléctrica con una geometría y fuerza establecidas, lo que destaca el hecho de que una anomalía PE medida es una caída de potencial debido al flujo de corriente en el suelo. Dichas fuentes dan como resultado anomalías de diversos tamaños (de metros a decenas de metros) y amplitudes de milivoltios a decenas de milivoltios. Para un terreno homogéneo e isótropo, la geometría de las fuentes determina la forma de la anomalía del PE; sin embargo, la existencia de cualquier variación de resistividad distorsiona la forma de la anomalía.

### 2.6.1.2 Fundamento Teórico

Como se mencionó anteriormente, el PE es un método que se basa en medir los potenciales naturales desarrollados en la tierra por procesos electrocinéticos, es decir, cuando un fluido pasa a través de un medio poroso, genera que las cargas positivas del líquido se han atraídas y acumuladas en la superficie sólida generando el fenómeno de la DCE.

Cuando exista un gradiente de presión que fuerce al líquido a fluir respecto al sólido, el exceso de cargas positivas se arrastrara con el flujo creando una corriente eléctrica de convección ( $I_{conv}$ ), la cual generará que las cargas móviles se disipen aguas arriba y se acumulen aguas abajo, creando una diferencia de potencial eléctrico. Esto dará como resultado un desequilibrio entre las cargas positivas que se encuentran aguas arriba (baja presión), y las cargas negativas, aguas abajo (alta presión), dicha separación de cargas genera un potencial de transmisión que llevará una corriente de conducción ( $I_{cond}$ ) de regreso a través del fluido.

Caso contrario ocurre cuando se presenta un estado en equilibrio para un medio capilar o poroso con una matriz no conductora, estas dos corrientes,  $I_{conv}$  e  $I_{cond}$  se estabilizan entre sí. De acuerdo a la ecuación de Poisson, la capa difusa propuesta por Gouy-Chapman, y el perfil característico de velocidad parabólico del flujo, las corrientes de convección y de conducción se pueden expresar de la siguiente manera:

$$I_{conv} = -\pi\varepsilon \frac{\zeta}{\eta} G\Delta P \quad (4)$$

$$I_{cond} = \pi \sigma_w \frac{\zeta}{\eta} G \Delta V \quad (5)$$

Donde

$I_{conv}$  = corriente eléctrica de convección

$I_{cond}$  = corriente de conducción

$\Delta V$  = diferencia de potencial de transmisión

$\Delta P$  = diferencia de presión que impulsa al flujo

$\sigma_w$  = conductividad del fluido

$\varepsilon$  = permitividad dieléctrica del fluido

$\zeta$  = potencial zeta

$\eta$  = viscosidad

$G$  = factor geométrico.

Con las ecuaciones 6 y 7 y algunos pasos algebraicos se obtiene:

$$\Delta V = - \frac{\varepsilon \zeta}{\eta \sigma_w} \Delta P \quad (6)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = - \frac{\varepsilon \zeta}{\eta \sigma_w} \quad (7)$$

La ecuación 7 es conocida como Helmholtz-Smoluchowski y la relación  $\frac{\Delta V}{\Delta P}$  se denomina como el cociente de potencial de transmisión C.

### **2.6.1.3 Metodología de campo**

El método de potencial espontáneo se ha empleado en diversos estudios como se mencionó anteriormente, sin embargo, una de las aplicaciones que se han desarrollado desde años atrás han sido los estudios en aguas. En 1976 Corwin describió las anomalías subacuáticas de PE relacionadas a los depósitos de minerales conductivos situados en aguas someras. Por otro lado Jasen en 1995 describió la correlación entre anomalías negativas registradas de PE bajo el agua y los posibles caminos de filtración (Rozycki, 2006).

Hoy en día dichos trabajos se han desarrollado aún más y se han empleado en estudios geofísicos de presas, ya que una distribución anormal puede indicar una filtración anómala y la interpretación cuantitativa del campo eléctrico puede servir para estudiar el desarrollo de las filtraciones. Además, el PE es un método rápido, barato y útil en dicha inspección, debido a que la medida de la resistividad en una corriente continua es muy sensible con el contenido de agua.

Considerando que los trabajos anteriores tuvieron éxito es sus años, hoy, con un dispositivo de adquisición adecuado se pueden registrar las mediciones de PE en una presa bajo el nivel de agua del embalse. Otro rasgo importante de mencionar es que con un dispositivo electrónico en el fondo de un embalse se consigue una mejor sensibilidad, destacando mejor la forma de la anomalía de PE; esta última

característica es importante si el registro de campo de PE se debe a varias fuentes aisladas próximas entre sí.

Para registrar dichas medidas se emplean dispositivos de un solo electrodo o de dos electrodos con configuraciones diversas y con separaciones fijas, como un dispositivo de gradiente, los cuales serán explicados más adelante. Se recomienda que durante las medidas de PE se utilice un dispositivo fijo formado por un dipolo para monitorizar las corrientes telúricas o el ruido eléctrico industrial, ya que estos fenómenos se pueden confundir con anomalías de PE y este dispositivo permite eliminar dicha incertidumbre.

En este trabajo se ha empleado el método de potencial espontáneo en la presa Gonzalo N. Santos, mejor conocida como El Peaje, para poder determinar filtraciones aguas arriba de la cortina provocadas por tubificación, sifonamientos u otra alteración presente, con el fin de prevenir alguna amenaza que ponga en peligro la integridad de algún cuerpo de la presa.

Para llevar a cabo dichas mediciones se realizaron perfiles con los cuales se adquirieron datos de diferencia de potencial. Los perfiles se desarrollaron con la configuración del gradiente, sin embargo, existen diversas configuraciones y dispositivos que hacen que la susceptibilidad y los errores sistemáticos sean menores. Las configuraciones más utilizadas se mencionan a continuación:

### **2.6.1.3.1 Configuración del gradiente**

En esta técnica solo se utilizan 2 electrodos y se basa en medir con un multímetro la diferencia de potencial entre los dos electrodos, conservando entre ambos una distancia constante.

Para desarrollar esta técnica, en primer lugar, se define quien es el electrodo A y B y se unen a la terminal positiva y negativa del multímetro respectivamente. Realizada la primera medida y sin cambiar la polaridad del dispositivo, así como la distancia electrónica, se procede a tomar el resto de las medidas a lo largo del perfil, de forma que el electrodo A ocupe siempre la posición que ocupaba el electrodo B en la anterior medida.

#### *Ventajas*

- Utilización de poco cable eléctrico, lo que minimiza su exposición a las mordeduras de animales y actos de vandalismo.
- Fácil manejo y acceso del dispositivo, para evitar accidentes.
- En caso de observar problemas con el cable eléctrico, es más fácil de encontrar el lugar donde se encuentra la falla.

#### *Desventajas*

- La mala calidad de los datos obtenidos; esto se debe a que en el proceso de adquisición se llevan asociados ciertos errores como polarización, deriva y efecto contacto-suelo.

### **2.6.1.3.2 Configuración de base fija (o campo total)**

En este dispositivo, al igual que en el anterior se precisan dos electrodos, y se basa en colocar estaciones fijas de medida a lo largo del perfil que se haya definido previamente.

Al momento de realizar las mediciones se desplazará a una de las estaciones y se colocará un electrodo (que será el B), y se mide el potencial con respecto al electrodo A, que estará situado siempre en una misma base, denominada base de referencia, la cual supondremos que tiene un potencial cero. La correcta ubicación de la base referencia será fundamental a la hora de obtener resultados óptimos, siendo las zonas más idóneas aquellas que presentan un valor del potencial muy estable en el tiempo.

#### *Ventajas*

- No se obtiene problemas de acumulación de errores, ya que cada lectura está sujeta a las tres componentes del error (polarización, deriva y efecto contacto-suelo).
- Flexibilidad en el momento de colocar las bases, dado que se puede optar por densificar su número en aquellas zonas de especial interés.

#### *Desventajas*

Distancias mayores incluso de kilómetros que pueden llevar a:

- Aumento de la susceptibilidad del cable eléctrico a sufrir algún daño (imprevisto o vandalismo).

- Dificultad para encontrar la ubicación precisa de alguna falla.

### **2.6.1.3.3 Configuración multielectrónica**

Esta configuración es similar a la de base fija, sin embargo, no se desplaza estación por estación conectando el electrodo B con el de referencia, si no que se dispone de un gran número de electrodos, los cuales ya están conectados a la base de referencia mediante un cable multiconductor.

Mediante un sistema multicanal de adquisición de datos, se realiza de forma automática toda la secuencia de medidas, con el espaciado temporal que se requiera.

#### *Ventajas*

- Capacidad de realizar un gran número de medidas en un intervalo de tiempo más corto.
- Estimar con precisión la deriva de los electrodos, así como otras variaciones temporales de potencial, por ejemplo; corrientes telúricas.
- Mayor facilidad y precisión para filtrar las variaciones del registro de campo.

#### *Desventajas*

- Elevado costo en comparación con las otras dos configuraciones.

La acumulación de errores es un aspecto que se debe considerar como el más importante, ya que de ello depende la configuración que se utilizara. Se dice que la configuración de base fija es la más adecuada debido a la poca acumulación de errores que se tiene y su fácil manejo, mientras que la del gradiente se utiliza para



aquellas situaciones en las que, debido a la orografía del terreno, o a la gran vulnerabilidad del cable eléctrico a sufrir daños, haga inviable el empleo del método de base fija. Sin embargo, el costo económico y de tiempo son más elevados en la configuración de base fija que en la del gradiente, dado que la relación coste-calidad es muy baja. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó la configuración del gradiente por su simplicidad de operación, ya que las mediciones realizadas se llevaron a cabo sobre la superficie del agua de la presa, siendo un ambiente bastante complejo para la toma de mediciones.

#### **2.6.1.4 Fenómenos que contaminan las medidas de potencial**

En el método de potencial espontáneo medimos un potencial que ya existe de forma natural en el terreno, por lo que es imposible tratar de modificar algún parámetro de estudio como la intensidad o la frecuencia, y por lo tanto intentar de separar la señal de interés del resto conlleva a que las medidas de campo se vean afectadas por una gran variedad de potenciales espontáneos que perturban y enmascaran el potencial electrocinético, que es de nuestra especial atención.

El primer objetivo para lograr mediciones adecuadas, es reconocer cada uno de los posibles fenómenos perturbadores, para evitarlos o posteriormente sustraerlos de los datos de campo y obtener las variaciones espaciales del potencial electrocinético. Aunque comúnmente se denomina ruido a todas aquellas anomalías de potencial que no son del interés, según la nomenclatura de Corwin se debe distinguir entre error y ruido, siendo que, error, son todas aquellas fallas irreproducibles asociados al propio proceso de adquisición de datos, mientras que

ruido; son todos los potenciales generados de manera natural (ej. corrientes telúricas) o artificial (ej. corriente industrial) cuyos orígenes no está ligada al movimiento del agua en el terreno (Mainali *et al.* 1999). En el siguiente esquema se resume la mayoría de los fenómenos que perturban la señal de campo.

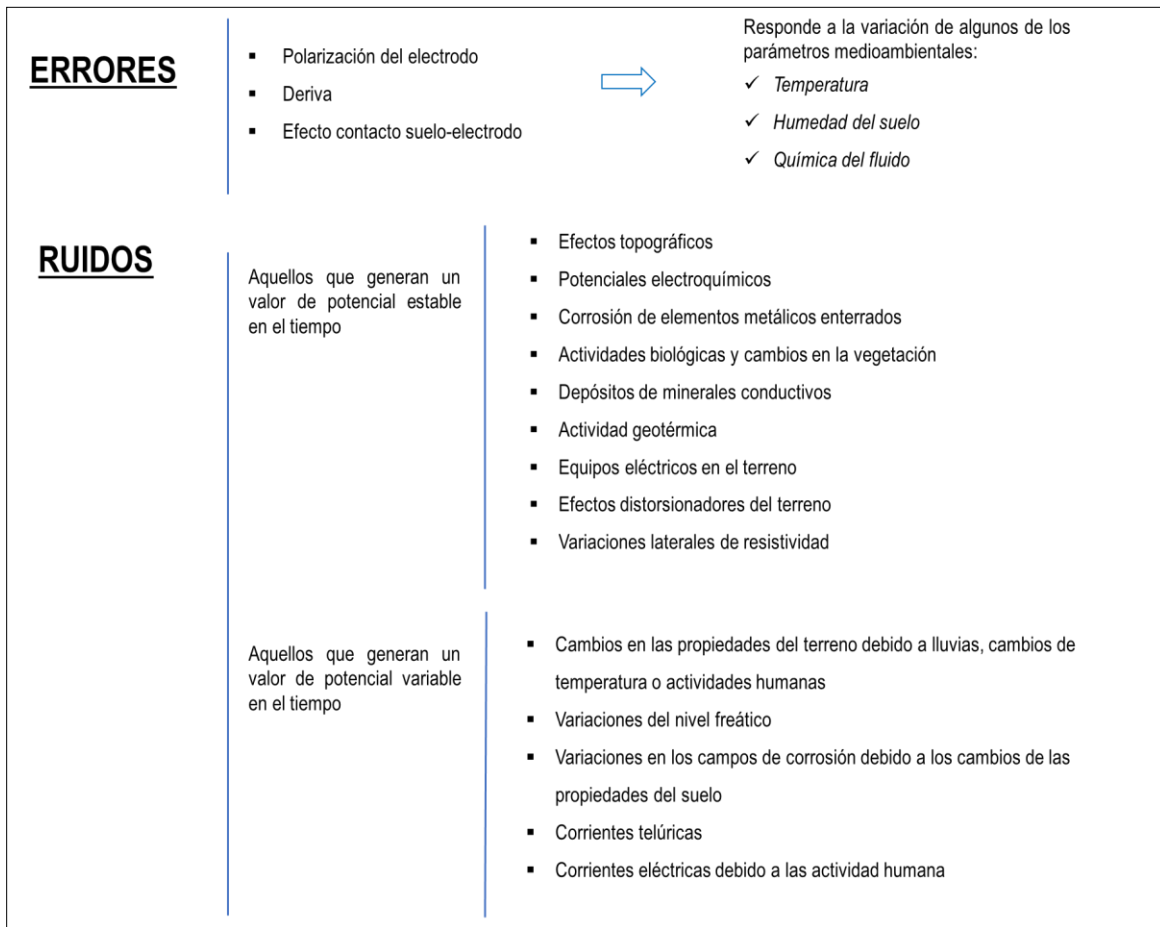


Figura 14. Resumen de diversos fenómenos que perturban la señal de campo (Mainali, *et al.* 1999),

Dentro de los errores que nos interesan enfatizar tenemos:

#### **2.6.1.4.1 Polarización y deriva**

La polarización se define como el potencial medido por un par de electrodos en ausencia de un campo eléctrico externo. Mientras que la deriva son variaciones temporales del valor de la polarización. Ambos fenómenos responden al cambio de algunos parámetros medioambientales como la temperatura, la humedad del suelo, y la química del flujo intersticial.

Los cambios en la humedad generan variaciones de algunos cuantos mV; por otro lado, los cambios de temperatura son los principales causantes de la deriva de los valores del potencial de polarización, los cuales pueden ser desde +0.5 a +1.0 hasta alcanzar los 10-20 mV. En cuanto a los cambios químicos, se pueden generar anomalías de potencial de algunas decenas de mV.

En el grupo de los ruidos se puede distinguir los que generan un potencial espontáneo constante y uno variable en el tiempo. Para la detección y filtración de los ruidos transitorios se estima previamente su periodo de oscilación temporal, estos pueden ir desde menos un segundo a horas, días o meses. Los de bajo periodo pueden ser detectados a través de las propias medidas realizadas, en cuanto a los periodos más grandes se precisa de métodos alternativos como monitores telúricos para su detección y filtración.

Dentro de los ruidos transitorios tenemos:

#### **2.6.1.4.2 Corrientes telúricas**

Son aquellos cambios de potencial debidos a las variaciones temporales del campo magnético terrestre, estas corrientes son de origen natural y sus variaciones temporales presentan unos periodos de oscilación entre los milisegundos hasta horas.

#### **2.6.1.4.3 Corrientes industriales o asociadas a la actividad humana**

Dentro de estas corrientes se sitúan las zonas industrializadas, las cuales generan grandes variaciones de potencial, en los que la amplitud de las anomalías puede ser de decenas a centenares de mV/Km.

En cuanto a los ruidos estables (o con una variación temporal muy lenta) se destacan:

#### **2.6.1.4.4 Efecto Topográfico**

En muchos casos el gradiente topográfico es fácil de reconocer, algunos autores descomponen la señal de campo en tres componentes; efecto topográfico, residual PE el cual corresponde a las anomalías provocadas a la litología, y ruido de PE debido a la actividad biológica.

#### **2.6.1.4.5 Corrosión de elementos metálicos enterrados**

Los elementos metálicos enterrados como tuberías, pueden generar anomalías de potencial de gran amplitud (centenas de mV) pero de signo negativo. Por lo que es

aconsejable un previo reconocimiento mediante técnicas electromagnéticas para localizar posibles elementos enterrados.

### **2.6.2 Método de Perfilaje Electromagnético**

Las técnicas electromagnéticas de exploración geofísica se utilizan en diversas áreas con la finalidad de estimar la resistividad del suelo. Dichas técnicas pueden ser divididas en dos grupos: en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. El método de Perfilaje Electromagnético (PEM) utiliza corrientes variables en el tiempo, y es considerado como un método de rápido avance, ya que tiene una alta productividad en adquisición de datos, lo que permite obtener información preliminar de la zona de estudio en un tiempo corto.

Con este método es posible detectar cambios horizontales o laterales de la conductividad o su inverso la resistividad del subsuelo, hasta una profundidad determinada por la frecuencia de la señal y la distancia entre la bobina transmisora y receptora. Este método, puede ser empleado en diferentes arreglos como sondeos o perfilajes, y son una herramienta importante en la investigación hidrogeológica en ambientes sedimentarios o aluviales, también puede ser utilizado en estudios de agregados, caracterización de zonas contaminadas, aplicaciones mineras y mapeo geológico.

En general, los sondeos son realizados con un transmisor constituido por una espira de alambre, una bobina o un dipolo eléctrico y un receptor formado por otra bobina o un dipolo. El principio operativo del PEM consiste en hacer circular una corriente que se inyecta a una espira, la cual produce un campo magnético primario estable

en el subsuelo, por la Ley de Faraday, se genera una inducción electromagnética de una corriente eléctrica en el suelo, la cual mantiene el campo magnético primario. A su vez, esta corriente crea un campo magnético secundario transitorio decreciente en la superficie, como se puede observar en la figura 15.

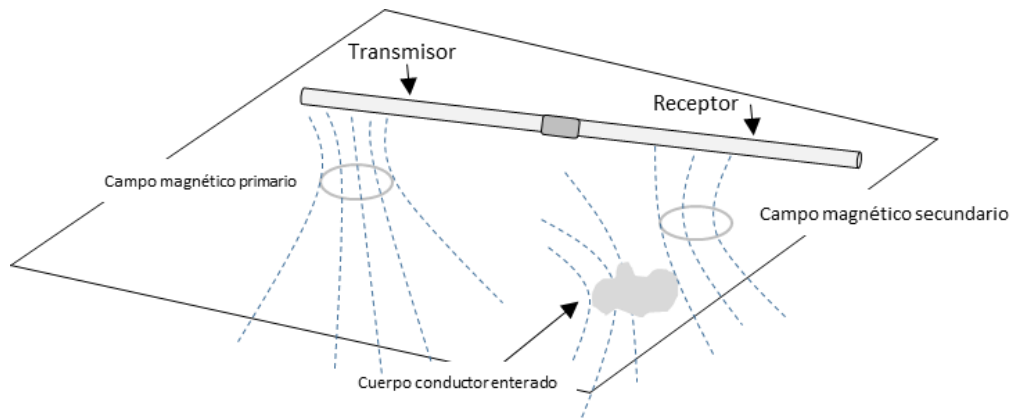


Figura 15. Configuración del Perfilaje Electromagnético

Los cambios del campo electromagnético secundario con el tiempo inducen un voltaje en la bobina receptora conocido como transitorio, de esta manera, la forma del decaimiento de este voltaje contiene información sobre la distribución de la resistividad del terreno debido a que la distribución de la corriente inducida depende de él. El carácter migratorio en profundidad de la corriente es usado como control de la profundidad, es decir, los voltajes de tiempos cortos proveen información de la resistividad somera, mientras que los tiempos largos generan información a una mayor profundidad.

### 2.6.2.1 Fundamento teórico

El fundamento teórico del método PEM se basa en la teoría electromagnética regida por las siguientes ecuaciones:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \text{Ley de Gauss (magnetismo)} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot E = q \quad \text{Ley de Gauss (electricidad)} \quad (9)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{Ley de Faraday} \quad (10)$$

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad \text{Ley de Ampere – Maxwell} \quad (11)$$

Si se considera la carga eléctrica en la Tierra como  $q=0$ , donde  $q$  es la densidad de la carga libre, y además se tienen las siguientes relaciones, que ligan los vectores básicos con la polarización eléctrica  $P$  y la polarización magnética  $M$ , se tienen:

$$D = \varepsilon E \quad (12)$$

$$B = \mu H \quad (13)$$

$$J = \sigma E \quad (14)$$

$$P = D - \epsilon_0 E \quad (15)$$

$$M = \frac{B}{\mu_0 - H} \quad (16)$$

Con ayuda de estas relaciones, las ecuaciones de Maxwell, por lo tanto, se pueden escribir como:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (17)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (18)$$

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (19)$$

$$\nabla \times E = -\sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (20)$$

Se debe considerar como se mencionó anteriormente una bobina transmisora que emite una señal alterna cerca de la superficie del terreno, y una bobina receptora colocada también en el terreno a cierta distancia del transmisor. Las corrientes generadas en la bobina transmisora inducen corrientes en el subsuelo, que a su vez crean un campo magnético secundario, ambos campos son registrados en la bobina receptora.

La relación entre los dos campos magnéticos está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{H_s}{H_p} = \frac{i\omega\mu_0\sigma^2 s}{4} \quad (21)$$



Donde

$H_s$ = campo magnético registrado en la bobina receptora

$H_p$ = campo magnético primario

$$\omega = 2\pi f$$

$f$ = frecuencia de la señal (Hz)

$\mu_0$ = permeabilidad magnética del vacío

$\sigma$ = conductividad del terreno (ohm/m)

$S$ = separación de las bobinas receptora y transmisora

El método PEM considera dos tipos de polarización de acuerdo a la posición de las bobinas; polarización horizontal, en la cual se implementan los dipolos horizontales con una profundidad aproximada de estudio de 3m, y la polarización vertical utilizando los dipolos en posición vertical y una profundidad aproximada de 6 m (Fig.16).

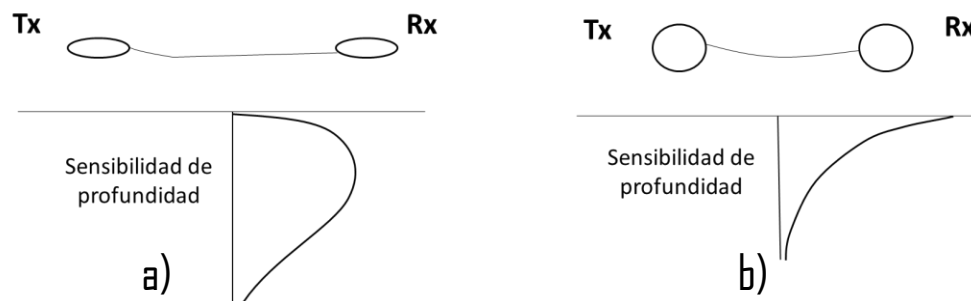


Figura 16. Ejemplo de las diferentes sensibilidades que presentan el dipolo. a) Polarización vertical; b) Polarización horizontal

### 2.6.2.2 Metodología de campo

Existen tres técnicas de PEM establecidas a partir de la relación de movimiento entre las bobinas transmisora y receptora, las cuales son:

- Transmisor fijo y receptor móvil (Turam)
- Transmisor móvil y receptor fijo (Turam)
- Transmisor móvil y receptor móvil con distancia fija entre ellos (Slingram)

Estas técnicas tienen diversos nombres como método Turam y Slingram, que corresponden a métodos electromagnéticos de fuente controlada (FDEM); sin embargo, el método Slingram, es el que se ocupa en el desarrollo del trabajo, ya que es el más utilizado debido a su fácil manejo, ya que no requiere de tendido de cables, por lo que su productividad y sencillez de mediciones les brinda una gran ventaja sobre otras técnicas.

El método Slingram es un sistema que trabaja con un transmisor (Tx) y un receptor (Rx) móviles con una distancia de separación fija (Fig.17).

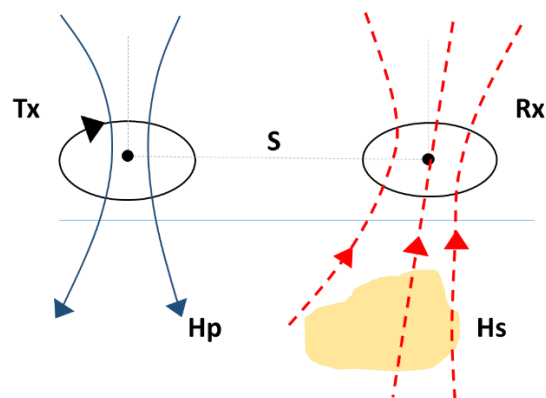


Figura 17. Representación esquemática del método Slingram;  $s$  es la distancia entre las espiras,  $H_s$  campo secundario y  $H_p$  campo primario. (Serral, et al. 2011)

La aplicación de este método provee simultáneamente dos tipos de información de la subsuperficie:

- La conductividad aparente (o su inverso la resistividad aparente)
- La susceptibilidad aparente

De la integración de esta información, es posible deducir sobre los parámetros de la fuente, objetos metálicos o zonas de contraste de conductividad y/o susceptibilidad con el entorno.

La forma general de operación del método se describe en los siguientes pasos:

- 1) A través de una bobina por la que circula una corriente alterna sinusoidal, se genera un campo electromagnético primario  $H_p$  que se propaga en la superficie como en el interior del terreno. Este campo está formado por una componente magnética y una eléctrica.
- 2) En presencia de un cuerpo conductor, la componente magnética del campo primario induce corrientes aleatorias, que a su vez genera un campo magnético secundario  $H_s$ .
- 3) Este campo secundario, junto con el campo primario que circula por la superficie del terreno, serán detectados por la bobina receptora, dando lugar a un campo resultante, que variará tanto en fase como en amplitud con respecto al campo primario, aspecto que proporciona información acerca del tamaño y conductividad eléctrica del elemento conductor (Serral, *et al.* 2011).

Los métodos electromagnéticos de fuente controlada en el dominio de la frecuencia, al igual que el resto de los métodos electromagnéticos, tienen como objetivo básico medir la conductividad eléctrica del terreno, y en algunos casos las propiedades electromagnéticas, como la susceptibilidad magnética *in situ*.

### **2.6.2.3 Ventajas del método**

Las aplicaciones del PEM están definidas en función de las características del instrumento y del tipo de estudio. Estas aplicaciones pueden variar desde algunos centímetros a varias decenas de metros de profundidad e estudio, con aplicaciones fundamentales en:

- Estudios ambientales
- Geotecnia
- Cartografía geológica
- Hidrología
- Exploración minera

En general, las ventajas que ofrece el método de PEM son:

- Gran sensibilidad a los terrenos conductores.
- Mayor resolución vertical.
- Buena detección de las anomalías de baja resistividad en un terreno conductor.
- Ejecución práctica debido a la ausencia de contacto con el suelo, y por lo tanto rápida en un terreno despejado.
- Utilización de diversas frecuencias que proveen mayor resolución vertical.

- Mayor capacidad de resolución.
- Mayor resolución en definición de estructuras estratificadas.

#### *Desventajas*

- Limitada profundidad de estudio.
- Alta sensibilidad al ruido electromagnético.
- Rango dinámico limitado: no apto para medios altamente resistivos.

### **2.6.3 Método de Tomografía Eléctrica**

La tomografía eléctrica es un método de resistividad multi-electródica que se utiliza en la geofísica para estudios 2D y 3D del subsuelo y que consiste en determinar la distribución de resistividades a partir de realizar una gran cantidad de medidas en la superficie del terreno. La base de dicho método es el empleo de técnicas numéricas como elementos finitos o diferencias finitas.

Este método tiene por objetivo determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida, además de detectar y localizar estructuras geológicas o de otro tipo como cavernas, cuerpos enterrados, entre otros; basados en el contraste resistivo del subsuelo. Esto se logra con la inyección de corriente al terreno mediante electrodos metálicos, que se desplaza de forma tridimensional (Fig.18) y puede variar por diferentes factores como saturación de agua, contenido de minerales, porosidad, etc.

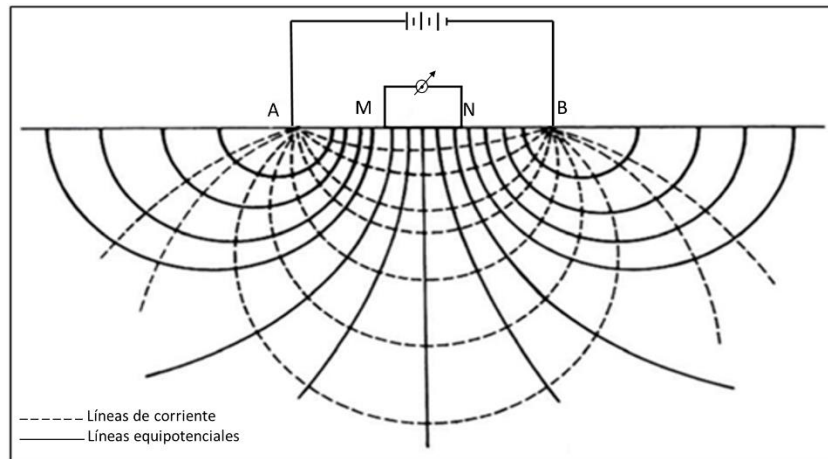


Figura 18. Comportamiento de la corriente inyectada en el subsuelo, donde A y B son los electrodos de corriente, y M-N los electrodos de potencial (Díaz Anaya 2010).

Un factor clave de esta técnica es el número y distribución de las medidas de campo, ya que de ellas depende la resolución y la profundidad de investigación, entre mayor sea el número de datos y menor el espaciamiento mayor será la resolución lateral.

### 2.6.3.1 Fundamento Teórico

El estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), es un método que permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo a profundidad y lateralmente.

Se estudia a lo largo de líneas en una dirección determinada, donde se inyecta una corriente eléctrica y mediante un dispositivo receptor se observa la respuesta del subsuelo, siendo el resultado, datos de resistividad aparentes.

La ejecución en campo consiste en colocar sobre un mismo perfil, electrodos con una determinada distancia de separación entre ellos; sobre los cuales se conectan y desconectan los electrodos de corriente y de potencial a fin de hacer varios puntos de SEV (Sondeos Eléctricos Verticales) pero sin mover físicamente los electrodos, como se aprecia en la figura 19.

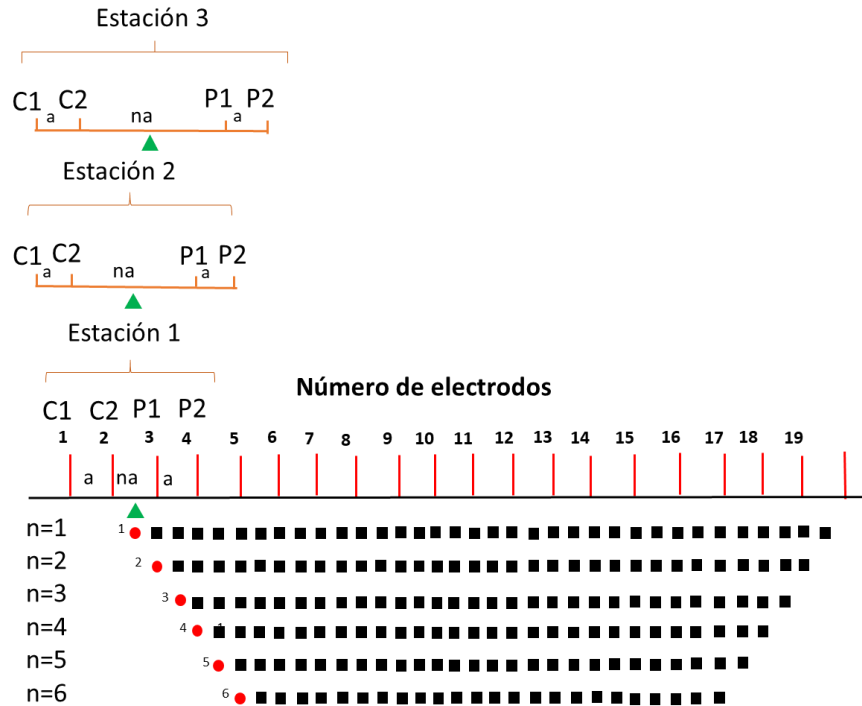


Figura 19. Esquema de la Tomografía de Resistividad Eléctrica

Se caracteriza por ser una técnica de resistividad multielectrónica, cuyo arreglo geométrico varía dependiendo del objetivo de estudio. Con las mediciones adquiridas se construye una sección en dos dimensiones (2D) que muestra una primera aproximación de los cambios del subsuelo. Posteriormente, se aplica un algoritmo de inversión para obtener la distribución real de resistividades o imagen eléctrica. Dicha imagen será un resultado interpretable desde un punto de vista físico y geológico, y que dará información sobre las características físicas del subsuelo (Fig. 20).

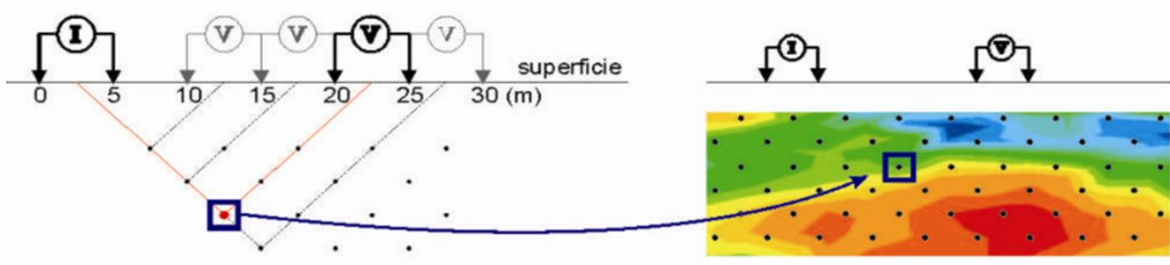


Figura 20. Representación simplificada de la técnica de TRE. (Zúñiga, 2002)

La TRE se destaca con respecto a los métodos de resistividad convencionales, por tener un proceso de adquisición de datos totalmente automatizado ya que cuenta con un software capaz de procesar eficazmente un gran volumen de información.

Existen diversos tipos de dispositivos lineales, simétricos, asimétricos, ecuatoriales, etc., en principio los cuatro electrodos pueden adoptar cualquier posición geométrica sobre el plano que representa la superficie del terreno. La mejor elección de configuración para realizar un estudio de campo depende del tipo de estructura a ser mapeada (forma, dimensión), profundidad a la que se pretende llegar, sensibilidad del aparato, nivel de ruido de fondo de la zona, la topografía y sobre todo el objetivo del estudio.

Los dispositivos más empleados son Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Polo-Polo, Polo-Dipolo, los cuales se muestran en la figura 21.



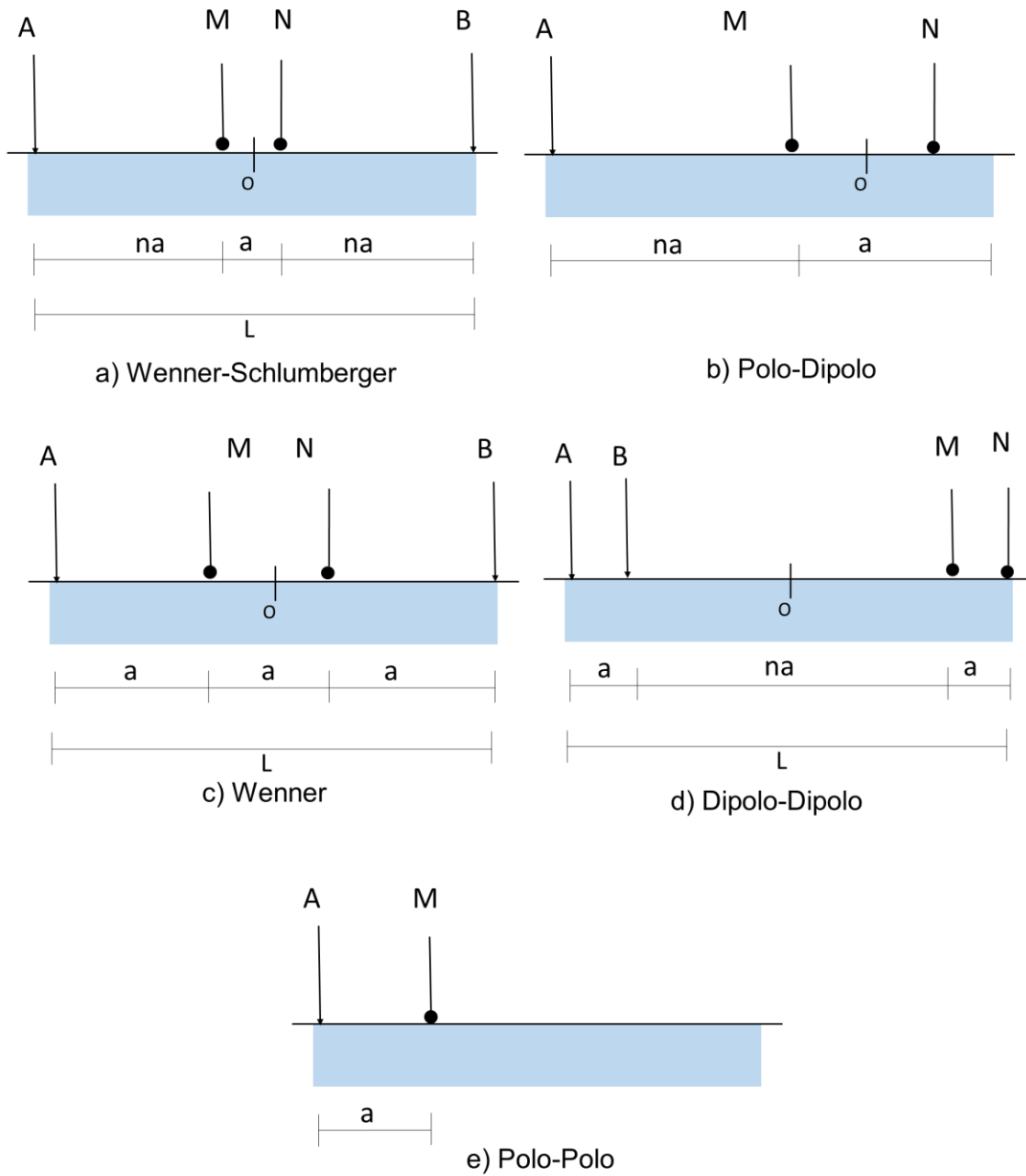


Figura 21. Diversas configuraciones. a) Wenner-Schlumberger; b) Polo-Dipolo; c) Wenner; d) Dipolo-Dipolo; e) Polo-Polo

### 2.6.3.2 Ventajas y desventajas del método

#### Ventajas

- Simplicidad de operación y alta productividad.
- La configuración de los datos puede ser interpretada por el algoritmo de inversión RES2DINV.
- Proporciona una imagen distancia-profundidad con la distribución real del suelo.
- Es una técnica multielectrónica, en la cual en todo el proceso de adquisición de datos es automatizado, lo que permite realizar un gran número de mediciones de resistividad, tanto en profundidad como lateral, en un espacio de tiempo relativamente rápido.
- Emplea diferentes técnicas numéricas, con lo cual se puede procesar un gran volumen de información.
- Se obtiene una sección o imagen 2D y 3D, lo que permite identificar con mayor facilidad las diferentes anomalías o zonas de interés.
- Es un método no invasivo.
- Se obtienen corte electro-estratigráficos, que brindan información litológica, estructural, hidrogeológica y determina zonas contaminadas.
- Óptima para determinar plumas contaminantes, sobre todo de hidrocarburos.

#### Desventajas

- No se puede aplicar en zonas con tendido eléctrico como áreas industriales o urbanas.

### 2.6.3.3 Metodología de Campo

A continuación, se describen las características de los tres tipos de dispositivos empleados en la adquisición de datos para la presa Gonzalo N. Santos con el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica.

#### 2.6.3.3.1 Configuración Polo-Dipolo

Esta configuración fue utilizada en la corona de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos. Consta de un electrodo de corriente que se lleva a una gran distancia, teóricamente en el infinito de los tres puntos AMN (Díaz Anaya 2010). La figura 22 muestra la configuración que se plantea para llevar a cabo las mediciones.

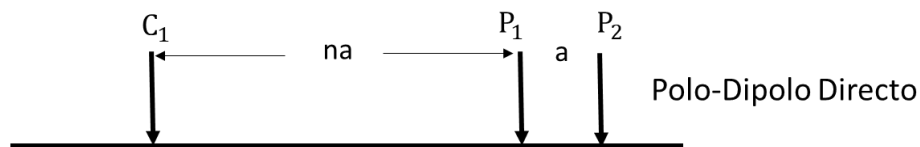


Figura 22. Esquema de la configuración eléctrica del dispositivo Polo-Dipolo

Donde la resistividad aparente se calcula de la siguiente manera:

$$\rho_a = 2\pi n(n + 1)a \frac{\Delta V}{I} \quad (22)$$

La configuración Polo-Dipolo tiene una buena cobertura horizontal, pero tiene una señal más alta comparada con el dispositivo Dipolo-Dipolo, y no es tan sensible al ruido telúrico como la configuración Polo-Polo. Debido a su buena cobertura horizontal, este conjunto es atractivo para medir resistividades con un sistema multielectrodo que posea un número relativamente pequeño de electrodos para que la señal sea lo suficientemente buena.

El conjunto Polo-Dipolo es un dispositivo asimétrico y sobre estructuras simétricas las anomalías de resistividad en la pseudosección son asimétricas. En algunas ocasiones, la asimetría en los valores de resistividad aparente puede afectar el modelo obtenido. Para evitar el efecto de esta asimetría se tienen que repetir las mediciones con un arreglo de electrodos inverso (Fig.23), dichas combinaciones entre las medidas realizadas en forma directa e inversa se eliminaran del conjunto de datos.

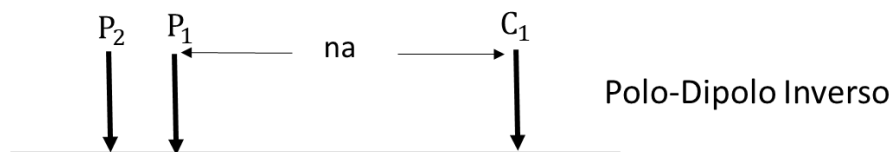


Figura 23. Dispositivo Polo-Dipolo inverso

## Ventajas y Desventajas

### Ventajas

- Presenta una buena cobertura horizontal, por lo que es eficiente para realizar mediciones de resistividad con un sistema multi-electrodo que posea un número relativamente pequeño de electrodos.
- Se pueden realizar mediciones combinadas de forma *directa* e *indirecta*.
- Es recomendable utilizar esta configuración, cuando se tiene un número limitado de electrodos.

*Desventajas*

- La señal es menor a los dispositivos Wenner y Wenner-Schlumberger, pero más alta que el dispositivo Dipolo-Dipolo.

**2.6.3.3.2 Configuración Dipolo-Dipolo**

Esta configuración se utilizó en la orilla derecha de la presa y aguas abajo de la cortina. La configuración consiste en que los electrodos se disponen sobre una línea en el orden ABMN formando así un doble dipolo (Díaz Anaya 2010). Es ampliamente usado por el bajo acoplamiento entre la corriente y los circuitos potenciales.

Ha sido utilizado en estudios de resistividad y polarización inducida (IP) gracias al acoplamiento entre los circuitos de corriente y potencial. La figura 24 muestra la configuración que se plantea para llevar a cabo las mediciones.

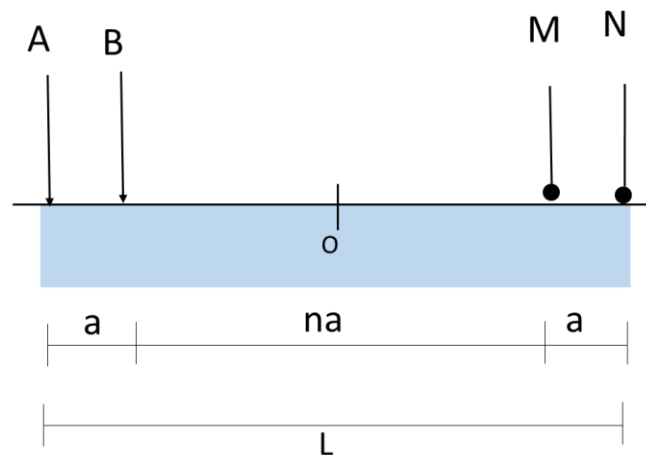


Figura 24. Esquema de la configuración electrónica del dispositivo Dipolo-Dipolo

La resistividad aparente se calcula con la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{\Delta V}{I} \quad (23)$$

### **Ventajas y desventajas**

#### *Ventajas*

- Altamente sensitivo a los cambios horizontales (estructuras verticales).
- Alta resolución para los contrastes laterales de resistividad.
- Resolución mayor en niveles cercanos a la superficie y es el arreglo que presenta un mayor número de mediciones.
- Es bueno para encontrar estructuras horizontales como diques o capas sedimentarias.

#### *Desventajas*

- Deficiente para detectar cambios verticales (estructuras horizontales).
- Baja intensidad de señal para valores grandes.
- La profundidad media de investigación depende del espaciamiento  $a$  y el factor  $n$ .

#### **2.6.3.3.3 Configuración Wenner**

Este dispositivo se utilizó aguas abajo de la cortina, en esta configuración los electrodos AMNB son equidistantes entre sí, a una distancia  $a$ . En la figura 25 se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos.

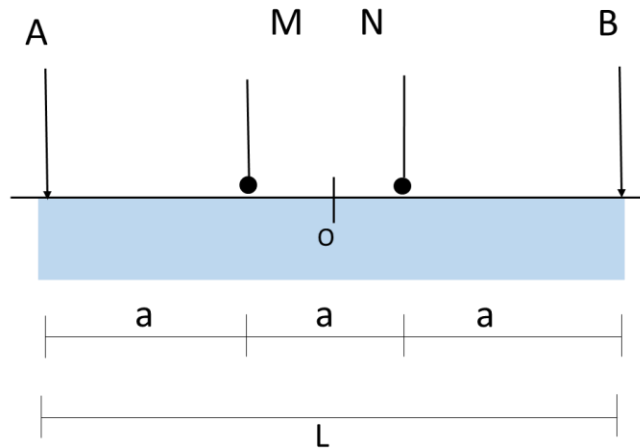


Figura 25. Esquema de la configuración eléctrica del dispositivo Wenner

Donde la resistividad aparente se calcula con la siguiente ecuación:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (24)$$

### **Ventajas y desventajas**

#### *Ventajas*

- Es el dispositivo indicado para la determinación de cambios de resistividad en la vertical, por lo que el dispositivo se encuentra indicado para el estudio de materiales horizontalmente estratificados.

#### *Desventajas*

- Baja cobertura horizontal, en cuanto se aumenta el espaciamiento entre electrodos.

Como se mencionó anteriormente, existen diversos dispositivos para determinar las mediciones de resistividad, sin embargo, la mejor elección para un sondeo de

campo depende del tipo de estructura a ser estudiada, la sensibilidad del resistivímetro, y el nivel de ruido de fondo.

De entre las características de un determinado arreglo debe considerarse los siguientes aspectos:

- La profundidad de investigación.
- Sensibilidad del arreglo a los cambios verticales y horizontales de la resistividad subterránea.
- Cobertura horizontal de datos.
- Relación señal/ruido.

#### **2.6.3.4 Profundidad de investigación**

La figura 26 muestra la profundidad media de investigación para las diferentes configuraciones, con ellos podemos obtener una idea de la profundidad a la que se puede sondear con una configuración en especial. Dichos valores son determinados al integrar la función de sensibilidad con la profundidad (López, s/f.).

Hay que destacar que las profundidades son válidas para un modelo homogéneo de tierra, si existen grandes contrastes de resistividad cerca de la superficie, la profundidad real de investigación podría ser diferente.



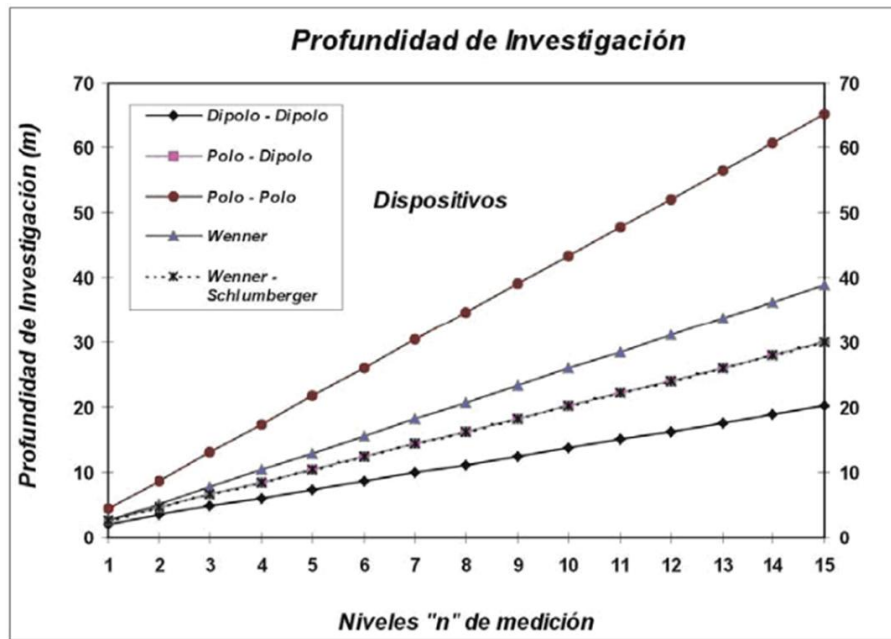


Figura 26. Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los diferentes dispositivos (López, s/f)

### 2.6.3.5 Sensibilidad

La sensibilidad es una función que muestra el grado en que un cambio en la resistividad de una sección del subsuelo influirá en la medida del potencial. A valores más altos de la función de sensibilidad mayor es la influencia de la región del subsuelo sobre la medida (Lopez, s/f). Para todas las configuraciones, los valores más altos de sensibilidad se encuentran cerca de los electrodos; a diferentes distancias desde los electrodos, los modelos de contorno son distintos para los diversos conjuntos.

Las diferencias entre los contornos ayudan a explicar la respuesta de los distintos tipos de estructuras, el rango de sensibilidad es único para un modelo de subsuelo determinado.

### **2.6.3.6 Relación señal/ruido**

La relación señal/ruido está conectada con el valor de la constante  $k$  de cada dispositivo y para el mismo modelo de subsuelo, es decir, a un mayor valor de  $k$  menor será la señal de potencial medida y viceversa. Por lo que la señal es inversamente proporcional al factor geométrico usado para calcular el valor de resistividad aparente.

## **Capítulo 3. Trabajo de Campo**

### **3.1 Adquisición de datos**

Para la adquisición de los datos en la presa Gonzalo N. Santos se desarrollaron tres campañas de medición, la primera consistió en la adquisición de Perfiles Electromagnéticos (PEM); la segunda en la toma de valores de Potencial Espontáneo (PE); la cual, a su vez se dividió en dos etapas; mediciones superficiales y mediciones sobre el fondo de la presa; y la tercera campaña consistió en Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE).

Para cada una de estas campañas se distribuyeron diversos puntos alrededor del embalse y cortina, con la finalidad de abarcar una mayor extensión de área posible.

El desarrollo de estas campañas se describe a continuación:

### **3.2 Mediciones de potencial espontáneo**

Para llevar a cabo las mediciones de potencial espontáneo en el embalse de la presa, se utilizó la configuración de gradiente, es decir, se utilizaron dos electrodos, los cuales se conectaron a través de cables eléctricos a un multímetro.

Como se explicó anteriormente, las mediciones de potencial espontáneo se distribuyeron en dos etapas; la primera que será descrita son las mediciones superficiales.

A continuación, se describe el equipo empleado para realizar las mediciones y algunos parámetros de registro tomados en consideración antes y durante el proceso de adquisición de datos que son de gran utilidad para mejorar la eficiencia del equipo.

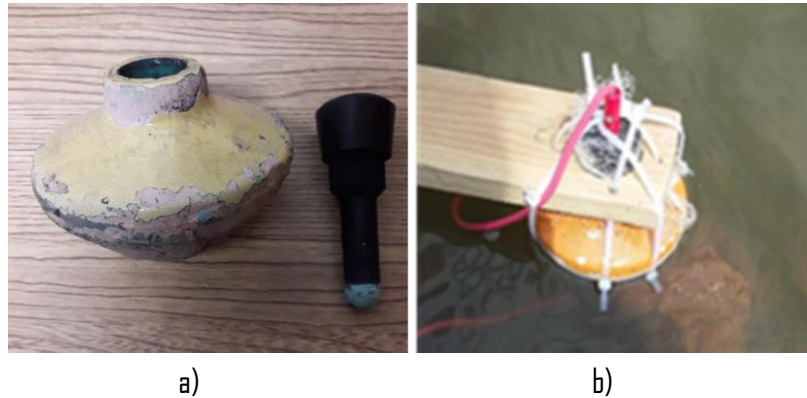
## **3.2.1 Mediciones Superficiales**

### ***3.2.1.1 Equipo de medición (electrodos no polarizables)***

Para la adquisición de datos de potencial espontáneo de modo superficial, se requiere de un sensor capaz de registrar el potencial natural provocado por las filtraciones del subsuelo, por lo que se utilizan electrodos no polarizables, elaborados de porcelana, los cuales en su interior se rellenan de sulfuro de cobre, para lograr una mayor sensibilidad en las mediciones.

Diversos estudios han comprobado la conveniencia de utilizar electrodos no polarizables en mediciones en embalses de presas ya que este tipo de electrodos reduce los fenómenos de polarización y de deriva.

Existen diversos tipos de electrodos no polarizables, sin embargo, los que se utilizaron para esta campaña de medición son de porcelana, con un electrodo de cobre sumergido en una solución de sulfato de cobre, el cual entra en contacto con el terreno a través de los poros del recipiente de porcelana. Dichos electrodos son hechos de tal manera que puedan ser movidos fácilmente, sin embargo, deben ser tratados con cuidado en especial en lo que respecta a la limpieza y fragilidad. En la figura 27 se puede observar los electrodos utilizados para obtener las lecturas.



*Figura 27. Electrodos empleados para las mediciones de PE en la presa Gonzalo N. Santos, a) Electrodo no polarizables, b) Electrodo amarrado al dispositivo de madera y conectado al multímetro*

### **3.2.1.2 Otros materiales y herramientas**

Además de los electrodos no polarizables, otros materiales que se ocuparon fueron:

- ✓ 2 Cables eléctricos
- ✓ 1 Multímetro
- ✓ 1 Tabla de madera
- ✓ 1 Cuerda
- ✓ 2 Flotadores
- ✓ 1 Lancha
- ✓ 1 Carrete

Con dichos materiales y herramientas se construyó un dispositivo equidistante de 2.5 m con un dipolo a cada extremo de la tabla conectados a través de cables eléctricos al multímetro, con el cual se obtuvieron las mediciones de PE, en la figura 28 se puede observar el dispositivo armado para las medidas.



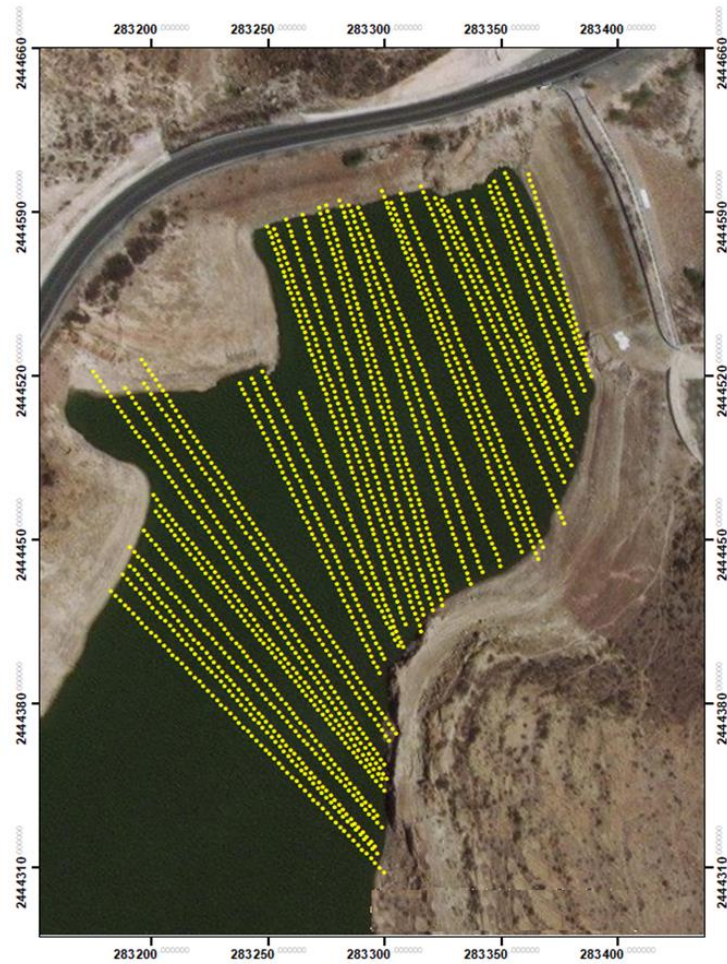
*Figura 28. Dispositivo utilizado para las mediciones de PE en la presa Gonzalo N. Santos*

Con ayuda de la lancha, la cuerda y el carrete se pudieron desarrollar las mediciones de PE, en la figura 29 se puede observar la toma de mediciones en el embalse de la presa.



*Figura 29. Mediciones de PE con el dispositivo armado*

Al finalizar con la toma de datos, se obtuvo un total de 44 perfiles de aproximadamente 140 m de largo. La distribución de dichos perfiles se puede observar en la figura 30, donde las mediciones se desarrollaron de forma paralela o semi-paralela a la cortina.



### Leyenda

••••• Perfiles de PE superficiales

*Figura 30. Distribución de los perfiles de PE superficiales en la presa Gonzalo N. Santos*

Para las mediciones de potencial espontáneo superficiales se realizaron espaciamientos no mayores a 2.5 m entre cada punto del perfil, esta separación está en función de la longitud del sensor, que también tiene una extensión de 2.5 m, por lo que ambos deben ser equidistantes.

Para el espaciamiento entre perfiles se estableció una separación aproximada de 5 m, basado en la extensión del área de estudio.

Un aspecto a evitar es realizar mediciones cerca de generadores, líneas de tensión, o sobre estructuras ubicadas en el subsuelo como por ejemplo tuberías, tubos, u algún otro elemento metálico como varillas, hormigón armado, etc., ya que todo ello altera considerablemente los resultados.

No es posible cuantificar con exactitud la distancia mínima que debe existir entre estas estructuras y el sensor para que el efecto sea el menor posible, ya que depende de diversos factores externos tales como el tipo de material, la profundidad de la estructura y el tipo de resultado a obtener.

### **3.2.1.3 Metodología de adquisición**

Una vez considerados los aspectos mencionados anteriormente se prosigue a montar el equipo, lo primero que se realiza es la ubicación de los perfiles a medir, para después realizar la instalación correcta del equipo. Una vez hecha la instalación, se procede a efectuar las mediciones cada 2.5 m.

Para llevar un control de los puntos monitoreados se hace necesario el uso de una bitácora de campo. En ella se puede registrar la información correspondiente a la fecha de adquisición, coordenadas geográficas, número de perfil, los valores de las mediciones y algún otro tipo de información pertinente.

Una vez finalizado la adquisición de datos, estos se introducen en el programa Surfer, el cual es una herramienta eficaz y rápida que tiene entre sus funciones la visualización en 3D, y la creación de mapas de isovalores.



El programa contiene diversas multifunciones de interpolación que transforman los datos XYZ en mapas y posee los siguientes algoritmos de interpolación: Distancia Inversa a la Potencia, Kriging, entre otros (Golden Software, 2014).

Con ayuda de este software fue posible desarrollar mapas que nos permitieron observar cambios, anomalías y otras cuestiones, ya que ha demostrado la importancia que tienen dichos análisis y técnicas en la evaluación de estudios asociados a las condiciones geológicas y estructurales que constituyen una parte importante de cualquier evaluación de la peligrosidad debido a las consecuencias catastróficas en la ruptura de las cortinas.

### **3.2.2 Mediciones sobre el fondo del embalse**

#### ***3.2.2.1 Equipo de Medición***

Para adquirir los datos de potencial espontáneo sobre el fondo del embalse, fue necesario elaborar un dispositivo que fuera capaz de deslizarse por la topografía del embalse y que a su vez pudiera transportar los electrodos respetando la equidistancia de 2.5 m. En la figura 31 se aprecia el sensor desarrollado para la toma de datos.

De igual forma que en las mediciones superficiales, se utilizaron electrodos no polarizables, los cuales presentan las mismas características mencionadas anteriormente.



Figura 31. Dispositivo elaborado para la toma de datos profundos

### **3.2.2.2 Otros materiales y herramientas**

Otros materiales que se ocuparon fueron:

- ✓ 30 m de cable de cobre
- ✓ 1 Multímetro
- ✓ 1 Cuerda
- ✓ 1 Lancha
- ✓ 1 Carrete
- ✓ 2 Recipientes de plástico

Con ayuda de la lancha, la cuerda y el carrete se pudieron desarrollar las mediciones de PE sobre el fondo del embalse. En la figura 32 se puede observar el dispositivo armado para la realización de las medidas.



*Figura 32. Mediciones de PE con el dispositivo armado*

Al finalizar con la toma de datos se obtuvo un total de 28 perfiles de aproximadamente entre 100 y 150 m de largo. La distribución de dichos perfiles se puede observar en la figura 33, donde las mediciones se desarrollaron de forma paralela a la cortina, tratando de abarcar la parte del embalse más cerca de la cortina.

Finalizada la campaña de medición se procede a la lectura de los datos obtenidos, para ello se sigue el mismo procedimiento que los datos superficiales.



**Leyenda**

- ● ● ● ● Perfiles PE sobre el fondo de la presa

*Figura 33. Distribución de los perfiles de PE profundos en la presa Gonzalo N. Santos*

**3.3 Mediciones de perfilaje electromagnético**

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó la metodología de Slingram con separación entre perfiles aproximadamente de 5 m. Las mediciones se llevaron a cabo utilizando la polarización vertical con una profundidad de 6 m, generando 86 perfiles con un total de 1757 puntos alrededor de la cortina y embalse de la presa Gonzalo N. Santos. Sin embargo, se puede observar en la figura 34, que el recuadro

de color rojo representa solamente el área a estudiar, donde se aplicaran los métodos geoelectricos PE y TRE, correspondiendo este recuadro a un total de 34 perfiles con 400 puntos del PEM.

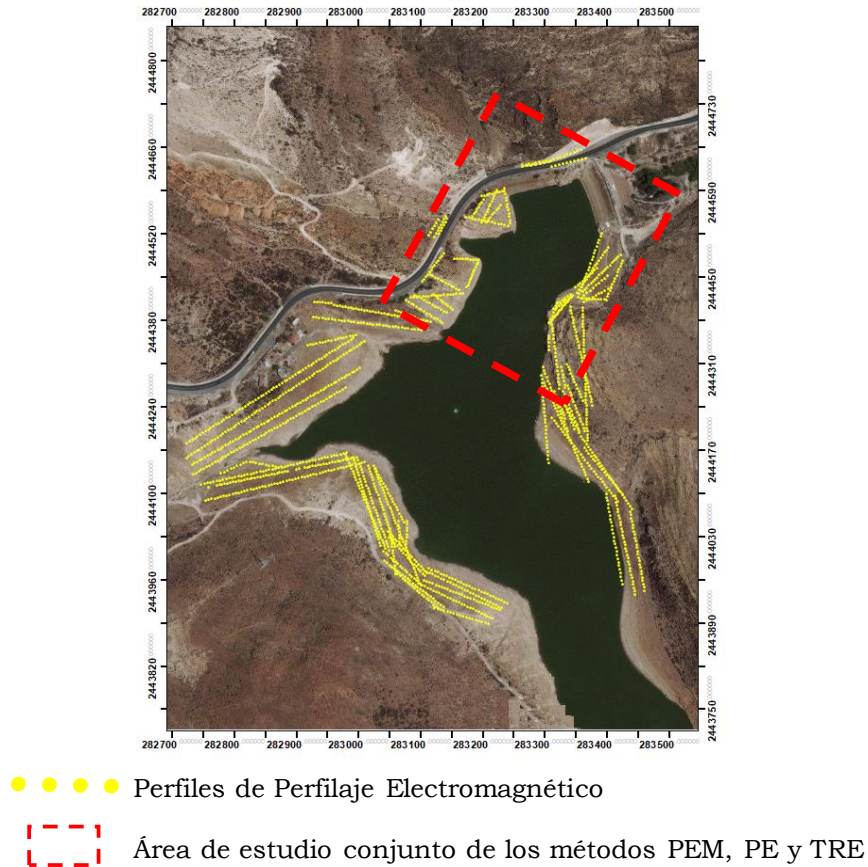
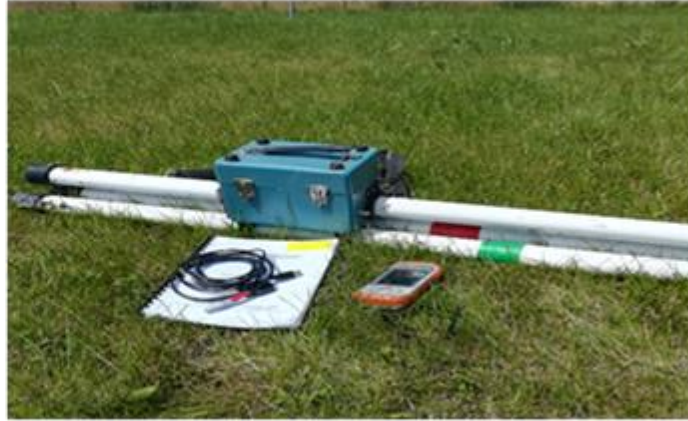


Figura 34. Ubicación y distribución de los perfiles de perfilaje electromagnéticos

### 3.3.1 Equipo de medición

El equipo a utilizar fue el EM31-K2 desarrollado por la Geonics Ltd. Este equipo consta de dos bobinas acopladas, una transmisora y otra receptora, a una distancia de 3.66 m. A través de la bobina transmisora se emite un pulso electromagnético de

frecuencia 9.8 KHz que induce un campo secundario en el subsuelo que a su vez se mide por la bobina receptora (Figura 35).



*Figura 35. Equipo EM31*

Con este equipo se puede trabajar con dipolos horizontales y una profundidad máxima de estudio de 3 m, o con dipolos verticales y una profundidad máxima de estudio de 6 m. El equipo mide conductividad (cuadratura y fase) y susceptibilidad magnética (fase) del subsuelo y estas mediciones se registran directamente en una computadora de campo integrada al equipo; además se muestra el valor de la fase entre el campo primario (generado por el equipo) y campo secundario (generado por el terreno) (Goelec, 2014).

Con este método inductivo, se pueden realizar estudios en la mayoría de las condiciones geológicas, contaminantes del agua subterránea o cualquier característica del subsuelo asociada con cambios en la conductividad del suelo.

Finalizada la campaña de toma de datos, se inicia con la etapa de procesamiento, la cual se inicia con la captura de los datos de la computadora de campo a una PC, para posteriormente leer y procesar dichos datos en el programa Surfer.

### **3.4 Mediciones de Tomografía de Resistividad Eléctrica**

Las mediciones de TRE se desarrollaron en tres lugares diferentes de la presa, los cuales se describen a continuación:

#### **3.4.1 Corona de la cortina**

Los primeros dos perfiles de TRE fueron realizados sobre la corona de la cortina con electrodos equidistantes cada 3 m, utilizando el arreglo Polo-Dipolo. En las figuras 36 y 37 se pueden observar la ubicación de los perfiles y su proceso de medición, respectivamente. Un primer perfil se realizó con dirección de avance desde la carretera hacia el vertedor, con el electrodo de corriente B ubicado suficientemente lejos como para considerarlo en el infinito, siendo por lo tanto una configuración AMN (Fig.36a). Un segundo perfil, desplazado 6 m del primero, se realizó con avance desde un punto de la corona de la cortina cercano al vertedor hacia la carretera considerando el electrodo A en el infinito, por lo que se tiene una configuración MNB (Figura 36b). Ambos perfiles tuvieron una longitud de 108 m y una abertura máxima de los electrodos de corriente  $AB/2=72$  m.

La medición e interpretación de ambos perfiles permitió en conjunto obtener una visualización de la distribución de las resistividades en la cortina hasta una profundidad máxima de 35 m.

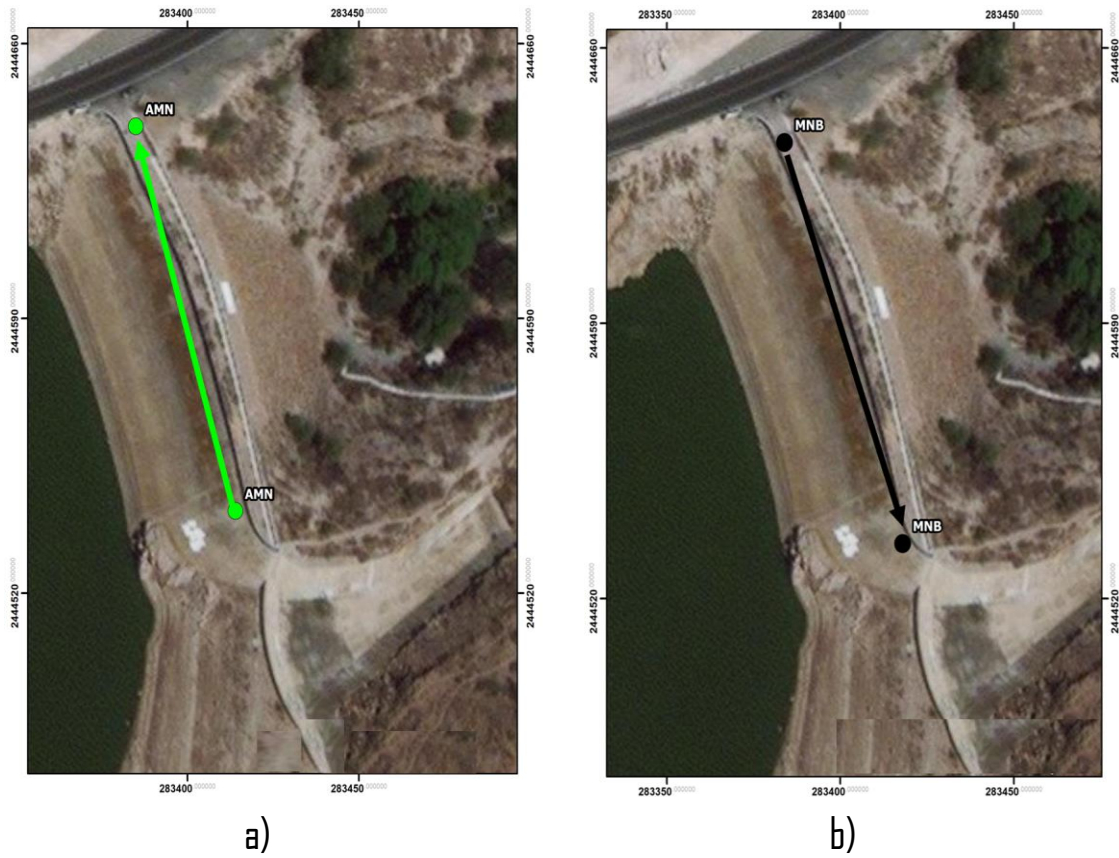


Figura 36. Distribución de los perfiles de TRE; a) Perfil AMN; b) Perfil MNB



Figura 37. Tomografía eléctrica sobre la corona de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos



### **3.4.1.1 Equipos de medición**

El equipo que se utilizó para la realización de la TRE sobre la corona de la cortina se denomina Syscal R2, el cual es un sistema de alta potencia diseñado para estudios eléctricos de corriente continua aplicados a la exploración de aguas subterráneas, estudios ambientales, ingeniería civil, investigación de geología estructural y exploración de minerales, entre otros. En la figura 38 se muestran el equipo utilizado para la adquisición de datos.



*Figura 38. Equipo Syscal R2 (empleado para la adquisición de datos en la corona de la presa)*

### **3.4.1.2 Otros materiales y herramientas**

Otros materiales que se emplearon en la TRE son los siguientes:

- ✓ Batería externa de 12V
- ✓ Cable de batería externa
- ✓ Caimanes
- ✓ Electrodo de acero inoxidable
- ✓ Caimán para cable
- ✓ Cables

- ✓ Carretes de cable
- ✓ Cinta métrica
- ✓ GPS
- ✓ Martillo
- ✓ Salmuera

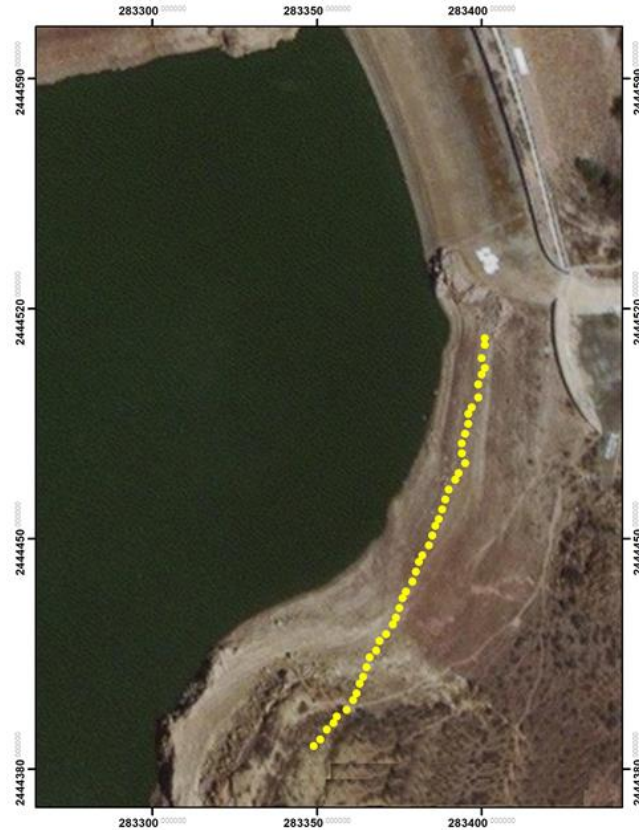
De igual forma que en los métodos anteriores, es necesario el uso de una bitácora de campo, para llevar un control sobre las mediciones. En ella se registra la información correspondiente a las coordenadas del lugar, dirección de la tomografía, si es AMN o MNB; tipo de configuración utilizada, los valores de resistividad y alguna otra información importante.

Una vez concluido con la toma de datos, la siguiente etapa es el procesamiento por el programa Res2Dinv. El cual es un software de inversión que permite producir un modelo en 2 dimensiones del subsuelo a partir de los datos de resistividad aparente obtenidos en campo (Geotomo Software, 2010).

Sin embargo, para este procesamiento fue necesario realizarlo por separado, es decir, primero procesar el perfil AMN y después el MNB.

### ***3.4.2 Orilla derecha de la presa***

Esta tomografía se llevó a cabo sobre la orilla derecha, con electrodos equidistantes a cada 4 m con una distancia total de 135 m, realizada con la configuración Dipolo-Dipolo. En la figura 39 se puede observar la distribución del perfil de TRE.

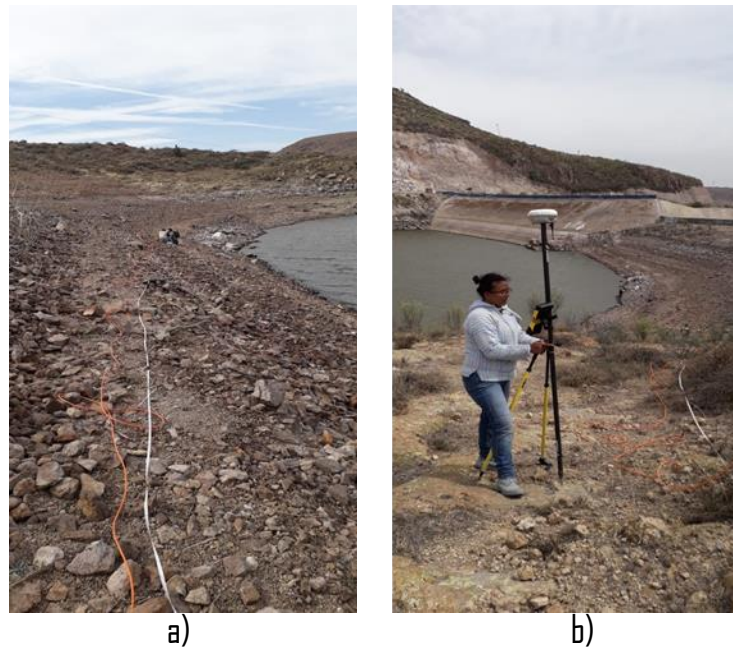


### Leyenda

● ● ● ● ● Perfil de TRE orilla derecha de la presa

*Figura 39. Distribución de la TRE sobre la orilla derecha de la presa*

En total se distribuyeron 47 puntos de medición. Las mediciones se desarrollaron paralelamente a la toma de datos con GPS Diferencial para obtener la topografía e incorporarla al modelo geoelectrico resultante (Figura 40).



*Figura 40. Mediciones de TRE. a) Distribución del perfil; b) Mediciones de GPS Diferencial sobre la orilla derecha de la presa Gonzalo N. Santos*

### **3.4.3 Aguas abajo**

Este perfil tomográfico se llevó a cabo aguas abajo con electrodos equidistantes a cada 4 m, con una longitud total de 90 m. en esta zona de la presa se realizaron dos tipos de mediciones, la primera, con la configuración Dipolo-Dipolo (mayor resolución hasta 10 m de profundidad de estudio), y la segunda con la configuración Wenner que, aunque con menor resolución, se alcanza una profundidad máxima de estudio de 18 m. En las figuras 41 y 42 se puede observar la ubicación del perfil y su proceso de medición, respectivamente.



**Leyenda**

● ● ● ● ● Perfil de TRE aguas abajo de la presa

*Figura 41. Distribución de la TRE aguas abajo de la presa*



*Figura 42. Mediciones de TRE aguas abajo de la Presa Gonzalo N. Santos*

### **3.4.3.1 Equipos de medición**

El equipo que se utilizó para la realización de las TRE se dominan Syscal Kid, el cual de la misma forma que el anterior es un sistema de alta potencia diseñados para estudios eléctricos de corriente continua aplicados a la exploración de aguas subterráneas, investigación de geología estructural y exploración de minerales, etc. En la figura 43 se muestran el equipo utilizado para la adquisición de datos.



*Figura 43. Equipo Syscal Kid (utilizado para la toma de datos en la orilla y aguas abajo de la presa)*

### **3.4.3.2 Otros materiales y herramientas**

Otros materiales que se emplearon en la TRE son los siguientes:

- ✓ Batería externa de 12V
- ✓ Cable de batería externa
- ✓ Caimanes
- ✓ Electrodo de acero inoxidable
- ✓ Caimán para cable
- ✓ Cables
- ✓ Carretes de cable
- ✓ Cinta métrica

- ✓ GPS
- ✓ Martillo
- ✓ Salmuera

De igual forma que en los métodos anteriores, es necesario el uso de una bitácora de campo, para llevar un control sobre las mediciones. En ella se registra la información correspondiente a las coordenadas del lugar, dirección de la tomografía, si es AMN o MNB; tipo de configuración utilizada, los valores de resistividad y alguna otra información importante.

La parte final es el procesamiento de los datos, los cuales son procesados en el programa Res2Dinv (Geotomo Software, 2010).

## **Capítulo 4. Resultados**

Se presenta la primera propuesta de caracterización para la presa Gonzalo N. Santos, en la cual se desarrolló una metodología para la evaluación de la cortina con base en el empleo de métodos geoelectricos como Potencial Espontáneo, Perfilaje Electromagnético y Tomografías de Resistividad Eléctrica.

En el presente capítulo se exponen los resultados de la integración de los diferentes métodos geoelectricos que contribuyeron a la determinación de las filtraciones en la cortina y alrededores de la presa Gonzalo N. Santos. Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación pueden ser utilizados como parte del control o monitoreo de la obra hidráulica y su relación con el medio ambiente y geológico.

### **4.1 Análisis de potencial espontáneo**

Uno de los métodos utilizados para caracterizar las filtraciones de la presa es el Potencial Espontáneo, el cual para su mejor análisis se dividió en dos variantes; medidas superficiales y medidas sobre el fondo de la presa. Con la aplicación de estas dos metodologías de PE se obtiene valores de diferencia de voltaje (mV), con los cuales se realizan mapas en el programa Surfer, que nos permiten observar la distribución de las anomalías alrededor de la presa.

Las primeras mediciones que se desarrollaron fueron las superficiales, recordando capítulos anteriores, se llevaron a cabo mediante la configuración de gradiente, con la utilización de un dispositivo elaborado, donde, en las orillas de dicho elemento se encontraban incrustados los electrodos no polarizables conectados



simultáneamente a un multímetro. El resultado es el mapa de diferencias de voltaje que se presenta en la figura 44.

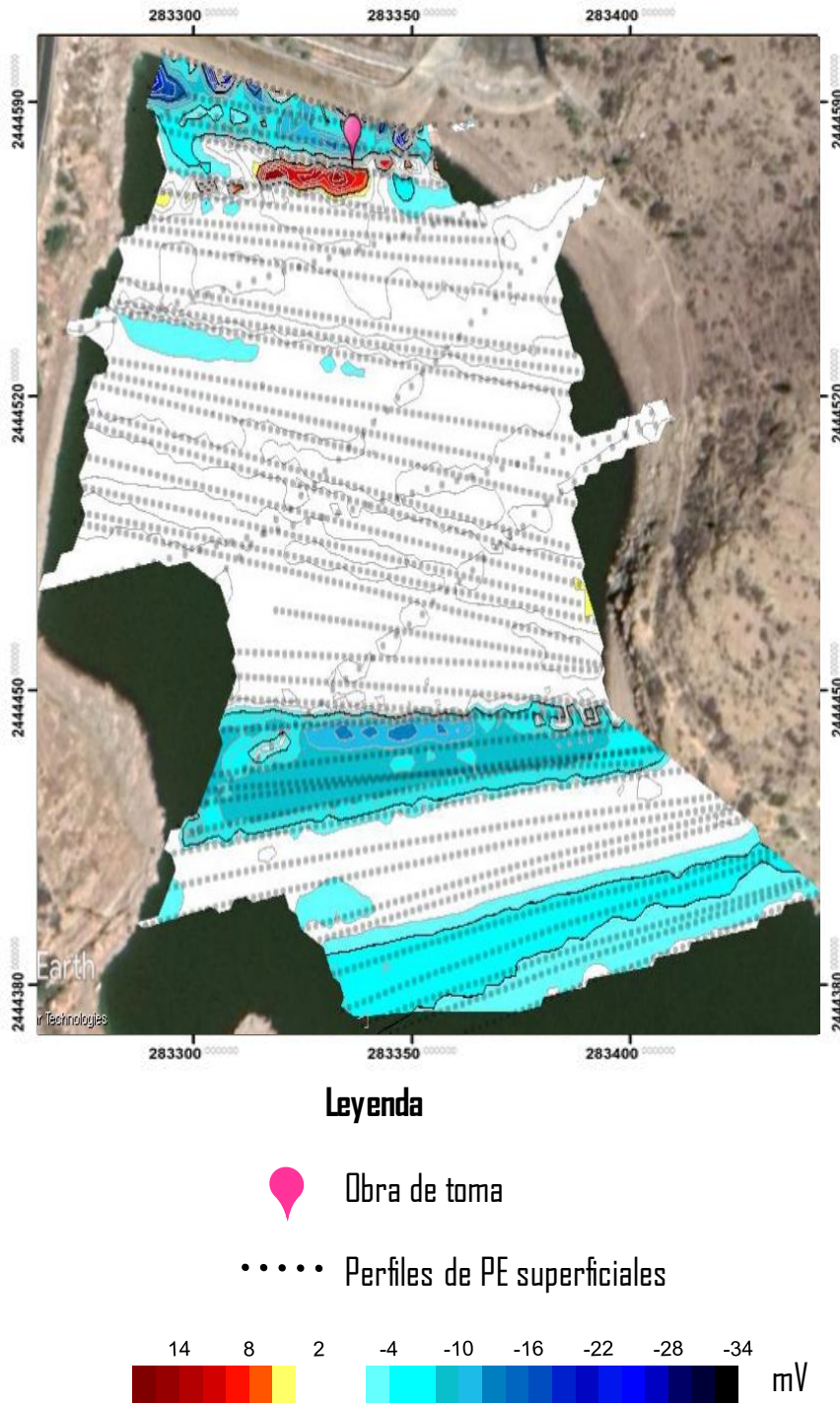


Figura 44. Mapa de anomalías de mediciones de PE superficial

En el mapa anterior de PE superficial se puede observar que se destacan anomalías que se distribuyen en la zona de la cortina con valores negativos (coloración azul), lo que significa que se generan zonas de saturación de agua que pueden representarse como zonas de filtración en dirección hacia aguas abajo.

Posteriormente, continua hacia una zona de bajos potenciales, donde las anomalías disminuyen y existe una zona de baja amplitud en dirección al vaso de la presa. En dicha área, la ausencia de bajas amplitudes se puede deber a dos situaciones; la primera está asociada a zonas nulas de filtración en el vaso, es decir, que no existe un alto flujo de agua o negativos fuertes que pueda ser detectados; el segundo escenario, se debe a que el tirante de agua es mayor en la zona interna del vaso, favoreciendo a la existencia de una relación señal/ruido baja, por lo cual no es posible determinar ni detectar anomalías con claridad.

Por último, en la parte más alejada de la cortina, se presenta una zona de transición, de áreas con potenciales negativos a potenciales nulos, para proseguir a una zona nuevamente de potenciales negativos fuertes, lo cual indica que existe la posibilidad de la existencia de zonas de alta saturación o filtración de agua.

Debido a los problemas de resolución en el vaso de la presa obtenidos con las medidas de PE superficial, se realizó una nueva campaña de medición, que consistió en realizar de manera simultánea mediciones de PE superficiales y mediciones sobre el fondo de la presa; en total se desarrollaron 4 perfiles con dicha metodología. Además de estimar la profundidad del vaso mediante un flexómetro con contrapeso.

El resultado fue la elaboración de un mapa de la profundidad y forma del vaso de la presa Gonzalo N. Santos, el cual se muestra en la figura 45.

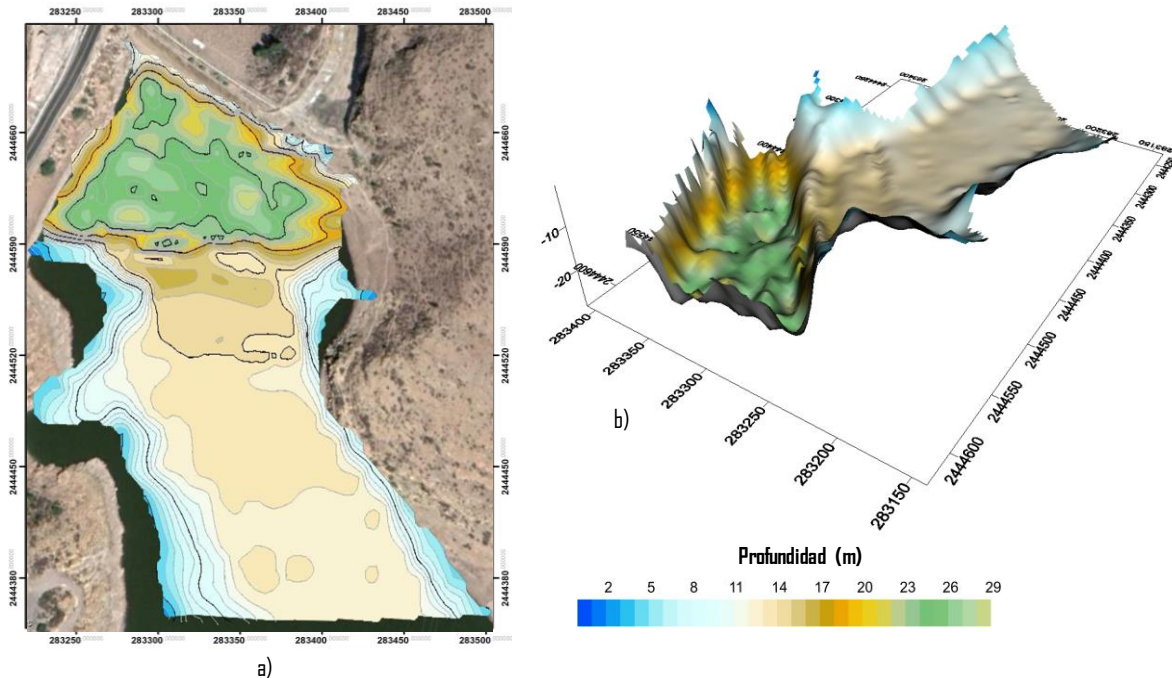


Figura 45. Mapa de la profundidad de la presa Gonzalo N. Santos. a) Vista en planta del embalse y su profundidad; b) Vista en 3D de la profundidad del embalse

Como se puede observar en la figura 45, existe un cañón o depresión topográfica de orientación NW-SE que se localiza en la parte más interna al norte del vaso, donde las profundidades alcanzan entre los 25 y 28 m aproximadamente, y es en ese punto donde existe una ausencia de anomalías, debido al gran tirante de agua que se presenta en dicha zona. Esto significa que las medidas de PE superficial son de baja amplitud por lo que la relación señal/ruido es muy baja.

Pasa lo contrario en la zona plana del vaso, de menor tirante de agua (entre 9 y 14 m), donde aumenta la relación señal/ruido, siendo posible detectar anomalías de PE.

Otro de los análisis que se llevaron a cabo con las mediciones simultáneas de PE fue observar la existencia de ciertas correlaciones entre las medidas superficiales y sobre el fondo de la presa, es decir, encontrar mediante graficas la presencia de anomalías que fueran observables tanto arriba como abajo.

Los perfiles a comparar se eligieron mediante dos criterios; ser un perfil simultáneo y estar ubicado en diferentes partes del embalse de la presa, es decir, en diversas posiciones respecto al vaso, de tal manera que dicha comparativa pueda servir para nuestros propósitos. En la figura 46 se muestra el mapa con la ubicación de los tres perfiles a comparar.

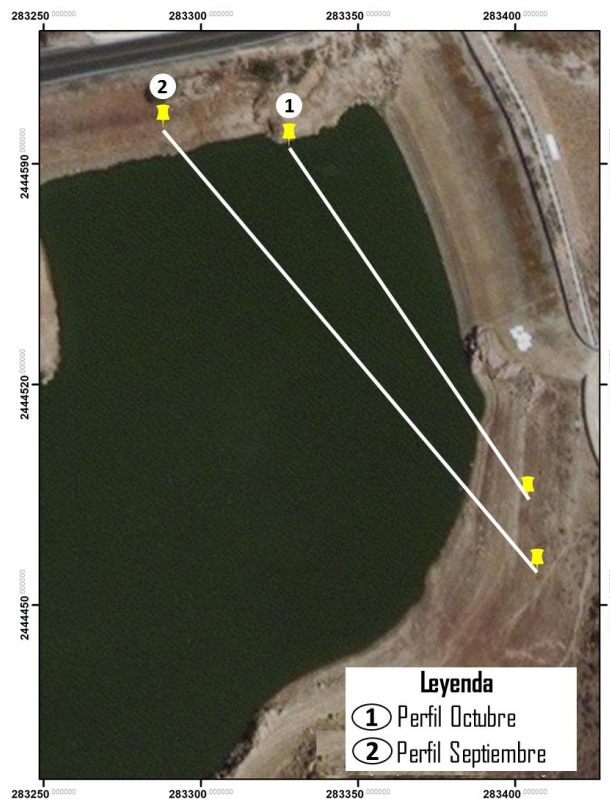


Figura 46. Ubicación de los perfiles con medidas simultáneas

Las gráficas comparativas se elaboraron a partir de los datos obtenidos durante la campaña de medición, mediante la ayuda del programa Grapher 11, el cual nos permite elaborar gráficos de calidad de forma rápida y sencilla (Golden Software, Inc. 2014).

En las figuras 47 y 48 aparecen como líneas rojas las diferencias entre las mediciones de PE sobre la superficie del agua y en el fondo de la presa, así como la curva (línea azul punteada) de profundidad.

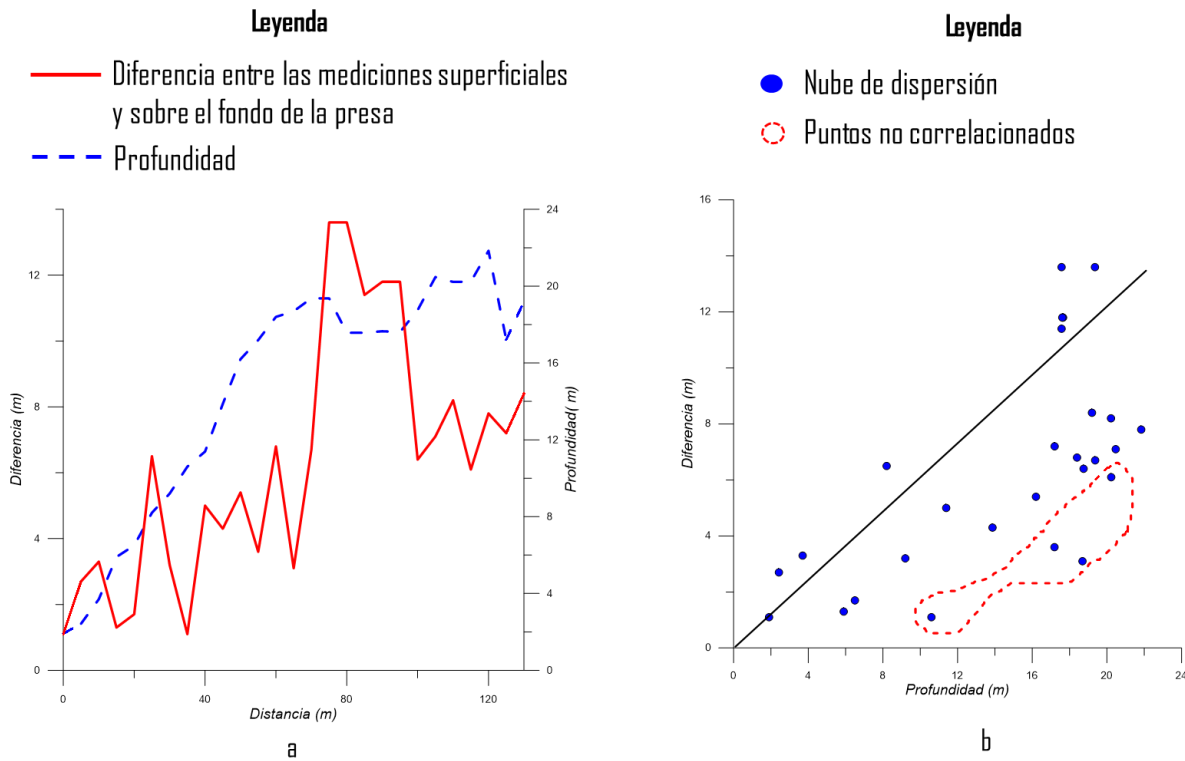


Figura 47. Gráficas comparativas del mes de octubre. a) Comparativa entre diferencias (PE superficial-PE profundo) respecto a la profundidad; b) Gráfica de correlación

La gráfica 47 muestra el perfil medido en el mes de octubre, el cual se ubica al inicio del embalse, donde se puede observar en general una correspondencia entre el aumento de la diferencia de potenciales medidos y el aumento de la profundidad. La grafica de correlación entre ambas magnitudes muestra la misma tendencia, aunque existe un grupo de cuatro puntos (nube) cuya alta dispersión por debajo de la línea  $Y=X$  muestra que un aumento de la profundidad no necesariamente indica un aumento de las diferencias de potenciales medidos en la superficie y en el fondo de la presa.

La figura 48 muestra el perfil medido en el mes de septiembre, ubicado en la parte central del embalse (perfil 2). En la figura 48 se puede apreciar que existe un buen ajuste entre ambos comportamientos, es decir, el aumento de las diferencias entre potenciales medidos y el incremento de la profundidad, y viceversa. En la gráfica de correlación correspondiente se observa poca dispersión de los puntos alrededor de la línea identidad  $Y=X$ , indicando la relación directamente proporcional de ambas magnitudes.

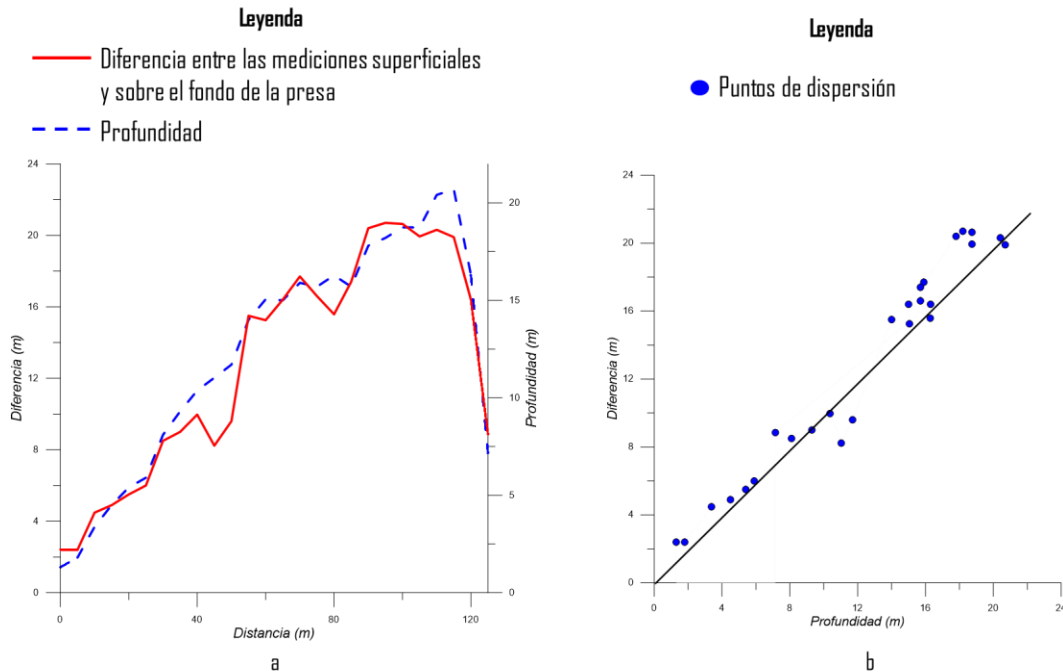
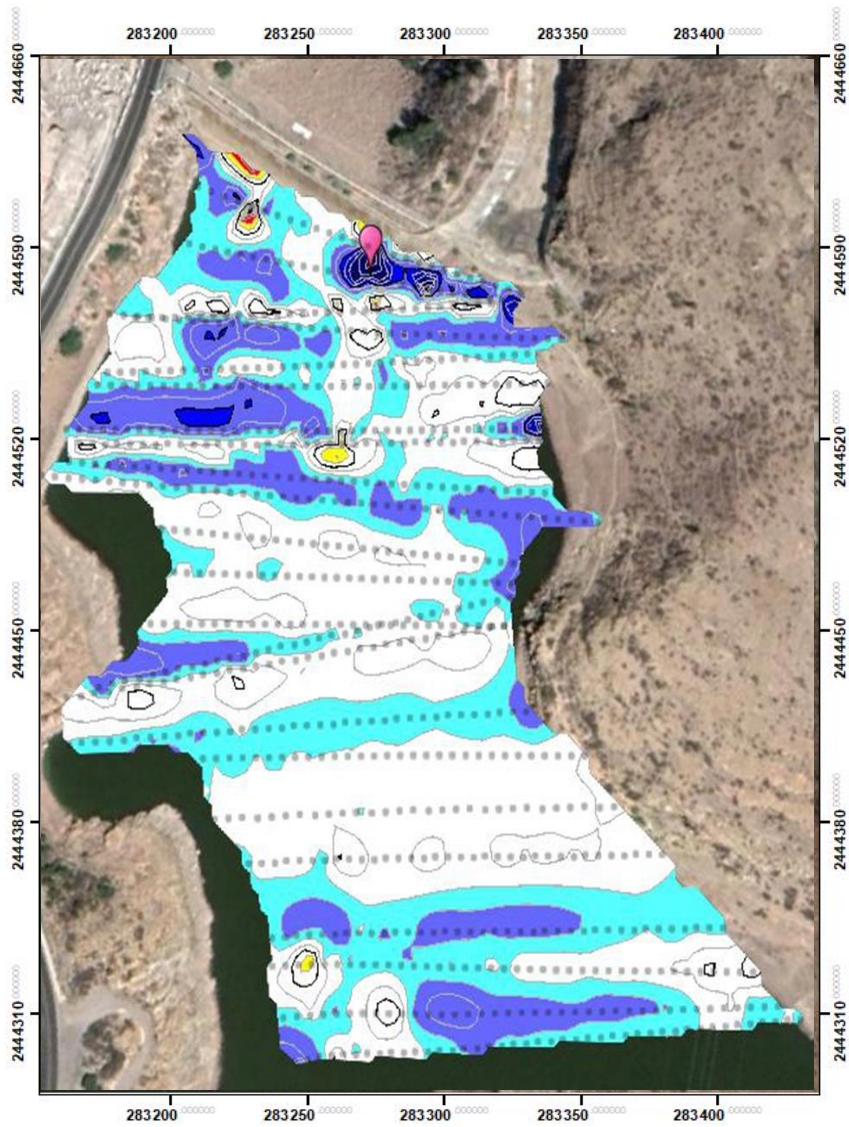


Figura 48. Gráfica comparativa del mes de septiembre perfil 2. a) Comparativa entre diferencias (PE superficial-PE profundo) respecto a la profundidad; b) Gráfica de correlación

Los resultados mostrados tanto en la figura 47 como en la 48 muestran que el incremento del tirante de agua en la presa, sobre todo en el cañón, donde las profundidades alcanzan valores en el rango de 20 a 28 m, las mediciones superficiales de PE son poco o no sensibles a los potenciales electrocinéticos o de filtración, por lo que deben tomarse en consideración mediciones realizadas en el fondo de la presa.

Es por ello que se llevó a cabo una nueva campaña de mediciones de PE sobre el fondo de la presa, cuyo resultado de esta nueva campaña se presenta en la figura 49.



**Leyenda**




-  Ubicación de la obra de toma
  -  Perfiles de PE sobre el fondo de la presa
- 14 10 6 2 -2 -6 -10 -14 -18 mV
- 

Figura 49. Mapa de anomalías de PE profundo



El mapa de PE realizado en el fondo de la presa, presenta anomalías más notables en la zona del vaso, sin embargo, se puede observar que en la zona de la cortina no se muestran anomalías claras debido a que, por la disposición del dispositivo no fue posible desplazarlo con facilidad sobre la cortina, ya que se puede girar y realizar mediciones de manera errónea.

Es por ello, que el mapa de PE en el fondo del embalse es un complemento de las mediciones superficiales, cuya finalidad es integrar y definir con mayor claridad y exactitud las zonas de saturación o de filtración que se presentan en la presa Gonzalo N. Santos.

Con estos dos mapas se pudo determinar las zonas que presentan mayores filtraciones, gracias a los altos potenciales presentados, sin embargo, para poder tener una idea más clara y precisa de dichas zonas se realizaron levantamientos de Perfilaje Electromagnético alrededor de la presa, hasta donde la topografía del lugar lo permitió, a continuación, se presentan los resultados obtenidos.

## **4.2 Análisis de perfilaje electromagnético**

Como se mencionó anteriormente, fue posible la realización del PEM gracias a los accesos que permite la topografía del lugar. Por lo que se distribuyeron perfiles referenciados con una separación a cada 5 m, generando un total de 443 puntos de medición. Los valores obtenidos de conductividad eléctrica se convirtieron a valores de resistividad eléctrica en un rango aproximadamente de 50 a 200 Ohm.m.

La finalidad del trabajo de PEM fue destacar y comprobar las anomalías señaladas por el PE tanto superficial como por el fondo de la presa en los alrededores, además de determinar la tectónica del sitio.

Con los valores y coordenadas obtenidas durante la campaña de medición fue posible construir un mapa de resistividad eléctrica que se presenta en la figura 50.

En la figura 50 se pueden observar dos zonas anómalas de baja resistividad correlacionadas entre sí (zonas Ia, Ib, IIa y IIb), las cuales se presentan como posibles zonas de saturación, fracturación o filtración.

- Zona Ia. - La zona anómala Ia se encuentra de lado izquierdo de la presa. Esta zona se caracteriza por tener rocas de alta dureza de un color blanco con ciertas oquedades, y coincide con un bajo topográfico natural que continua hacia la parte derecha de la presa con una dirección NW-SE, misma orientación que presentan las fallas que se observan en el mapa de la geología local de la Sierra de San Miguelito (Figura 12).
- Zona Ib.- Se encuentra dentro de la parte derecha del vaso de la presa, se puede observar que es una continuación de la zona anómala I. En dicha zona se presenta un cambio de litología muy marcado, ya que las rocas cambian de un color blanco parduzco a un rosado, que corresponde a la Ignimbrita, descrita en capítulos anteriores. Se encuentra dentro de una alto topográfico que probablemente coincida con algunas zonas de resistividades altas que se presentan.

- Zona IIa. - Está localizada en la parte más alejada de la cortina de lado izquierdo, se presenta también en un bajo topográfico y las rocas son de color blanco parduzco igual que la zona la rocas de alta dureza. Esta anomalía continua hacia el lado derecho de la presa donde también se presenta una zona de alta saturación.

Zona IIb. – Se encuentra dentro de la parte derecha del vaso, y se puede observar que altas y bajas resistividades, productos de los alto topográficos que existen en esa zona, además se presentan zonas de saturación que coinciden con las expuestas en el mapa de PE sobre el fondo de la presa.

En general el mapa de PEM nos permite mostrar las zonas con mayor potencial anómalo gracias a las bajas y altas resistividades que se muestran en el mapa, además de corroborar las anomalías obtenidas por medio del método de potencial espontáneo. Dichas anomalías se presentan de lado derecho de la presa donde es posible identificar el cambio de litología, existe también un cambio de resistividades bastante claro.

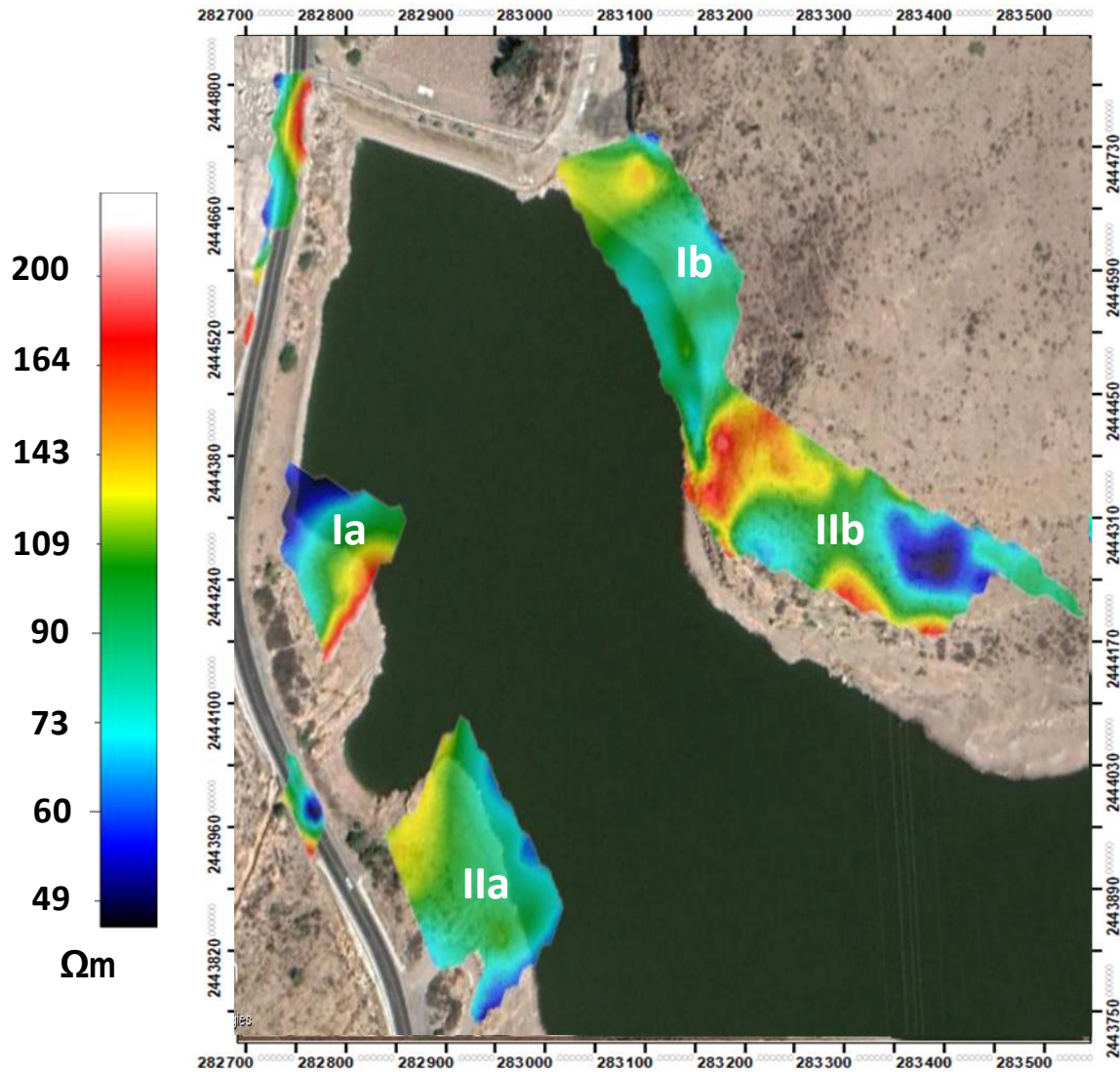


Figura 50. Mapa de Perfilaje Electromagnético

### 4.3 Análisis de tomografías de resistividad eléctrica

Otro de los métodos utilizados para caracterizar las filtraciones de la presa, son las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE), las cuales nos permitieron confirmar las anomalías halladas con el PEM.

Se realizaron en total cuatro tomografías en la toda la presa y como se mencionó en capítulos anteriores, la primera se llevó a cabo sobre la corona de la cortina.

Debido a la poca longitud con la que cuenta la cortina fue necesario utilizar la configuración Polo-Dipolo, ya que dicha disposición permite que las mediciones sean más profundas y generen la formación de dos secciones AMN y MNB, con lo que es posible trabajar de manera independiente cada sección, incluso sumarlas para conseguir un modelo mejor, sin embargo, en este trabajo no fue posible sumar ambos modelos debido a la presencia de ruido en la sección MNB.

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 51, donde cada una de las secciones se presenta por separado, para su mejor análisis.

La sección AMN tiene una trayectoria dirigida de la carretera hacia el vertedor, mientras que la sección MNB es en dirección contraria, es decir, del vertedor hacia la carretera, como se mostró en la figura 36.

En la sección AMN se puede notar la existencia de bajas resistividades a lo largo de todo el perfil de tomografía, esto se debe a la presencia de zonas de saturación producto de la época de lluvias. Además de estas anomalías, es clara la identificación de otras zonas con resistividades bajas en el centro de la sección, lo que nos indica la presencia de áreas de saturación localizadas en el centro de la corona de la presa, que pueden representarse como zonas de filtración.

Por otro lado, la sección MNB presenta resistividades más altas, esto se debe a la escasa presencia de agua durante las mediciones, debido a que su realización se llevó a cabo durante la época de bajas precipitaciones, generando así, resistividades alrededor de 400 y 600 Ohm.m, lo cual nos impide una clara precisión

de las anomalías. Sin embargo, se alcanza a observar pequeñas zonas de resistividades bajas en el centro de la presa y en algunas partes a lo largo de perfil.

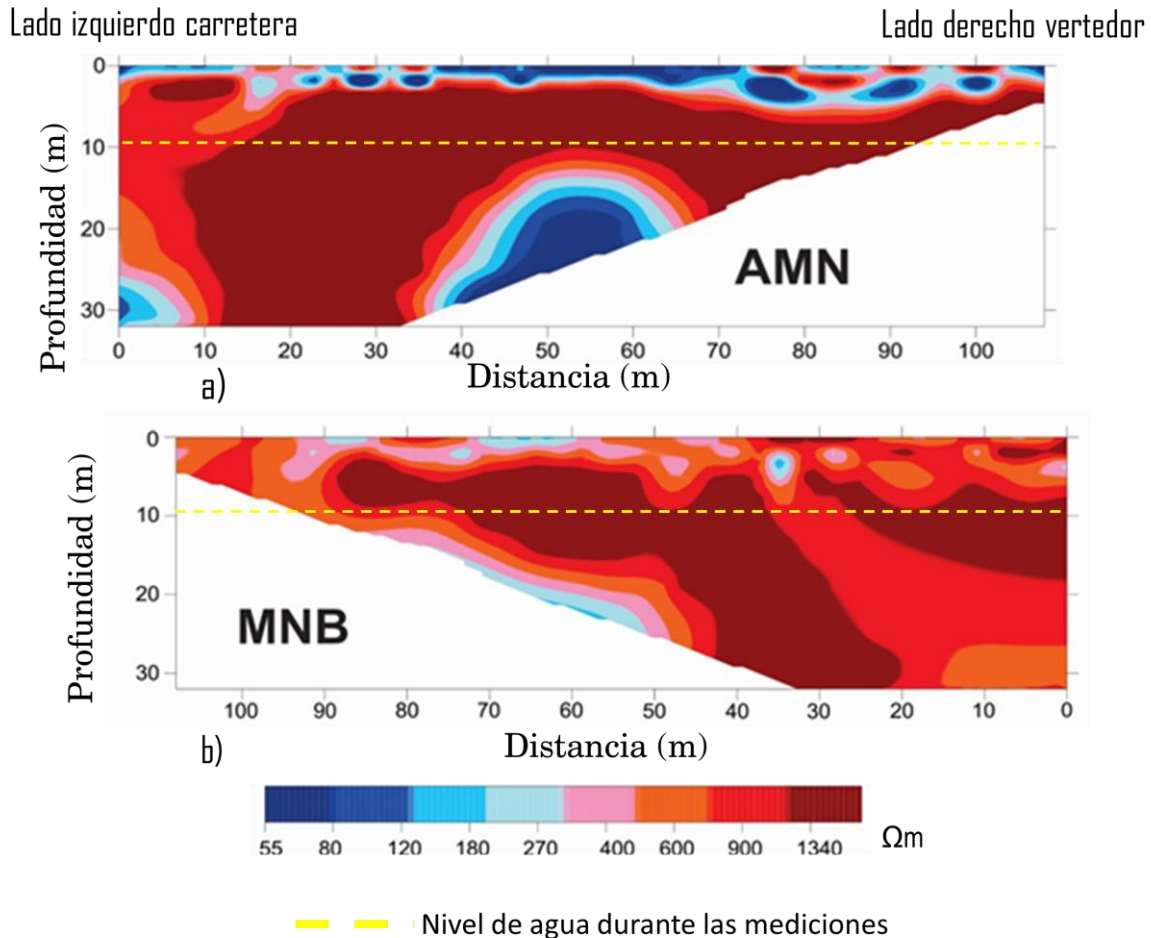


Figura 51. Secciones de TRE en la corona de la cortina. a) Perfil AMN en dirección de la margen izquierda hacia el vertedor; b) Perfil MNB en dirección del vertedor hacia la margen izquierda

La siguiente tomografía se realizó en la orilla derecha de la presa, es decir, del lado del vertedor. Esta TRE tuvo una longitud de 135 m, con espaciamentos entre cada electrodo de 3 m, con una configuración Dipolo-Dipolo. El resultado de la tomografía se muestra en la figura 52 junto con la ubicación de los puntos de medición.

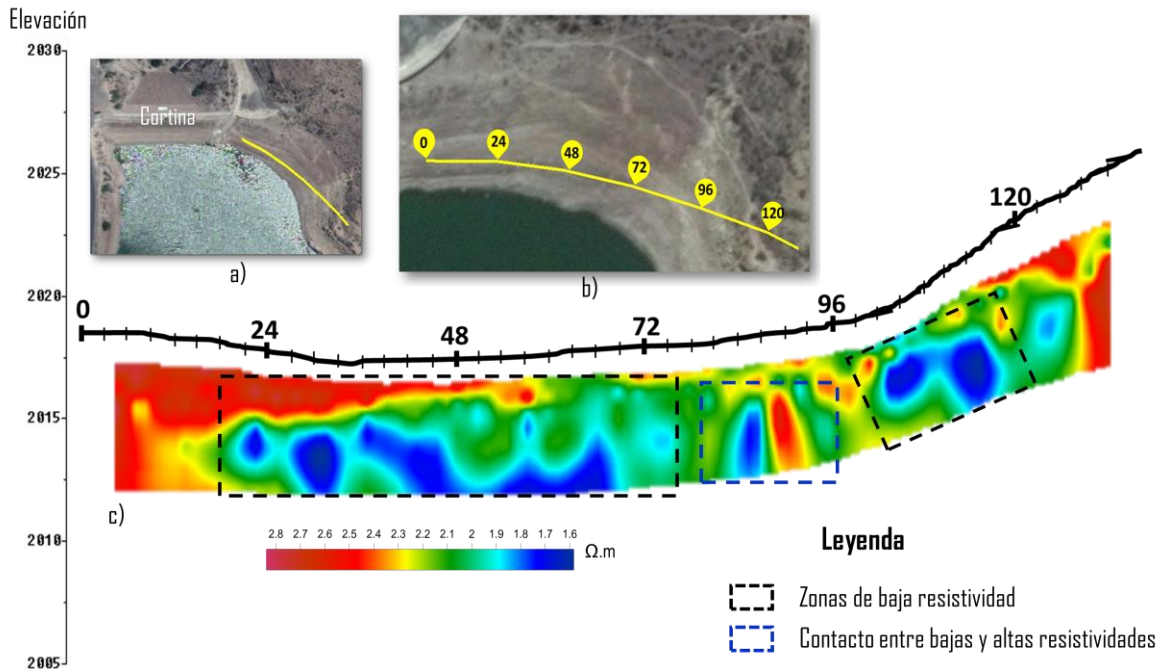


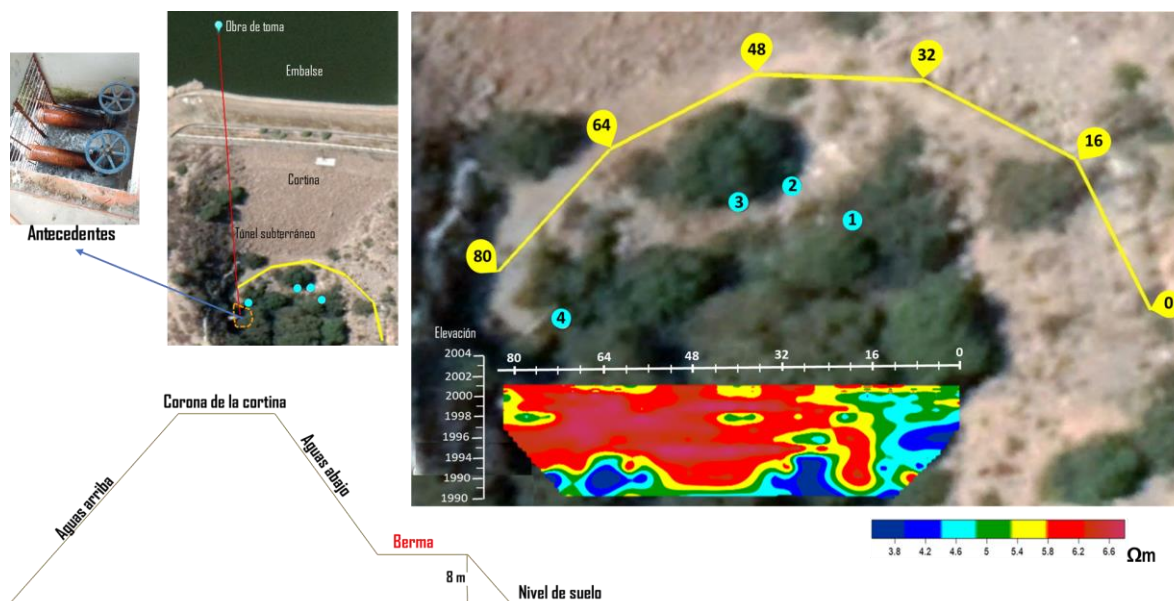
Figura 52. Sección de TRE, orilla derecha de la presa. a) Ubicación en planta del perfil de TRE sobre la presa Gonzalo N. Santos, b) Distribución de las mediciones sobre el perfil de TRE, c) Sección de TRE orilla derecha

En la sección de tomografía de la figura número 52 se puede observar que existen amplias zonas de bajas resistividades entre los 24 y 84 m aproximadamente, para después presentarse una pequeña región de altas resistividades a los 87 m, esta parte representa el cambio de litología que se mencionó en los resultados de PEM, por lo que los resultados de tomografía nos confirman dicha área. Posteriormente, da inicio nuevamente un área de bajas resistividades.

Los resultados obtenidos a través de la TRE de la orilla de la presa, nos permitieron corroborar los datos obtenidos mediante el PEM, lo que nos indica que las zonas que se encuentran junto al cambio de litología muestran bajas resistividades, quizás este cambio permite con mayor facilidad la fluidez de agua a través de las rocas que

se encuentran en dicha área, por lo que es posible que en esta zona se presenten filtraciones.

La última tomografía se realizó aguas abajo de la presa, con una longitud de 90 m y con espaciamiento de electrodos a cada 4 m. Esta TRE se desarrolló con una configuración Wenner y Dipolo-Dipolo. La figura 53 presenta la ubicación de la TRE junto con la sección de tomografía.



*Figura 53. Ubicación de la sección de TRE aguas abajo de la presa. a) Ubicación en planta del perfil de TRE sobre la presa Gonzalo N. Santos, b) Distribución de las mediciones sobre el perfil de TRE, c) Sección de TRE aguas abajo*

En la figura anterior se puede apreciar la ubicación de las anomalías y la distancia a la que se encuentran respecto a la sección. En la figura 54 se presenta solamente la sección de tomografía, en la cual se puede observar la existencia de zonas de altas resistividades que ocupan la mayor parte del perfil, sin embargo, se puede apreciar la existencia de áreas de bajas resistividades sobre todo al inicio de la



sección, entre los 4 y 8 m. Además, se presentan otras entre los 24 y 28 m respectivamente y al final de la sección.

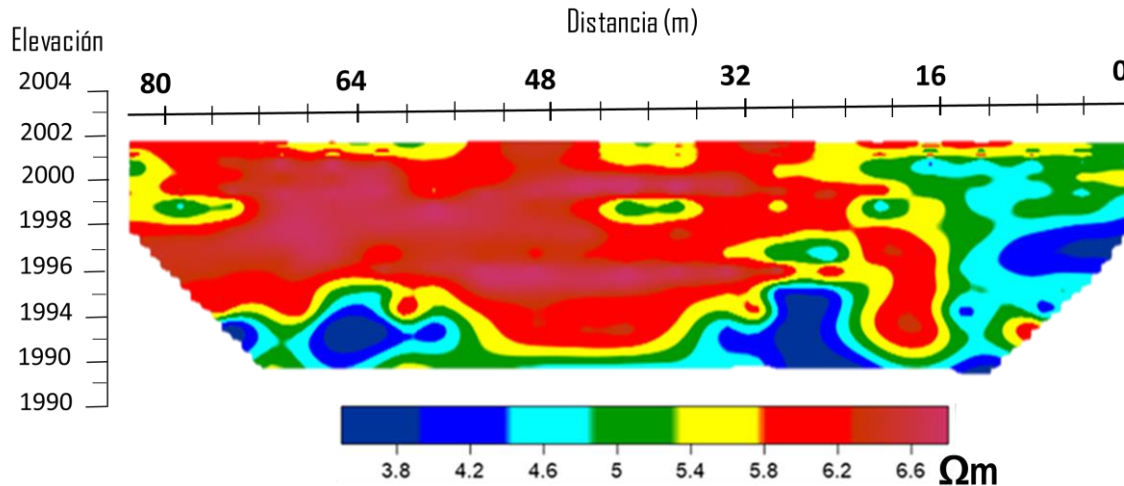


Figura 54. Sección de TRE aguas abajo de la presa

Las anomalías que se presentan en la sección 54, son áreas de filtración de agua que se distribuyen con una dirección de aguas arriba hacia aguas abajo. Dichas filtraciones de agua pueden estar asociadas a puntos de emanación de agua que se encontraron aguas abajo de la cortina, sin embargo, no se precisa que dichos puntos sean los que se presenten en las anomalías de la sección.

#### 4.4 Análisis de salinidad de agua

Un último análisis que se realizó en la presa Gonzalo N. Santos fue la medición de la salinidad de diferentes muestras de agua que se obtuvieron en una campaña de reconocimiento aguas abajo de la cortina. Estas mediciones se realizaron con el propósito de verificar, utilizando la salinidad del agua como traza, la identificación de las aguas provenientes de los puntos de surgencia aguas abajo con el agua del embalse. Si se toma en cuenta que la presa Gonzalo N. Santos tiene aportes de

aguas provenientes de arroyos afectados en mayor o menor medida por los poblados aledaños, su salinidad debe diferir en alguna de la proveniente de manantiales. Se obtuvo un total de cuatro puntos de medición, tres de ellos en puntos de surgencia de agua en la base de la cortina y un cuarto punto en la caseta de la obra de toma, lo que garantiza que dicha agua es proveniente del vaso de la presa, en la figura 55 se presenta la ubicación de dichos puntos.



*Figura 55. Ubicación de los puntos de emanación de agua abajo de la cortina de la presa*

En la figura 56 se presentan imágenes de los puntos de emanación de agua distribuidos debajo de la cortina de la presa.



Punto 1



Punto 2



Punto 3



Caseta

*Figura 56. Puntos de emanación de agua localizados agua abajo de la cortina*

El análisis consistió en tomar 600 ml de agua de los diversos puntos que se encontraron, a partir de ello, se realizaron mediciones de resistividad a través de un resistivímetro. Con los resultados obtenidos de resistividad, se realizaron nuevamente cálculos para obtener posteriormente la salinidad de las aguas. En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de salinidad.

Tabla 2. Salinidad de las diversas muestras de agua, recolectadas aguas abajo de la cortina de la presa Gonzalo N. Santos

Muestras de agua presa Gonzalo N. Santos		
Muestras	Punto	Salinidad (g/l)
1	1	<b>0.063</b>
2	2	<b>0.063</b>
3	3	<b>0.063</b>
4	caseta	<b>0.065</b>

Se puede observar en la tabla anterior que las salinidades son prácticamente similares de un punto a otro. La diferencia muy marginal entre la toma de la caseta y los demás puntos puede deberse a un muy ligero filtrado que se realiza en el trayecto de fuga por debajo de la base de la cortina, por lo que, se concluye que el agua que emana de la caseta y que proviene de la obra de toma es la misma que surge de los puntos encontrados debajo de la cortina, descartando la mínima posibilidad de que los puntos de surgencia aguas abajo provengan directamente de algún acuífero somero, y asegurando que es agua proveniente del vaso de la presa que se infiltra por debajo de la base de la cortina o por fracturas u oquedades en el parapeto de la misma.

Esta zona de filtración o saturación de agua se reporta en el perfil de tomografía que se mostró en la figura 54, donde se presentan áreas de bajas resistividades alrededor de la ubicación de los puntos de muestra.

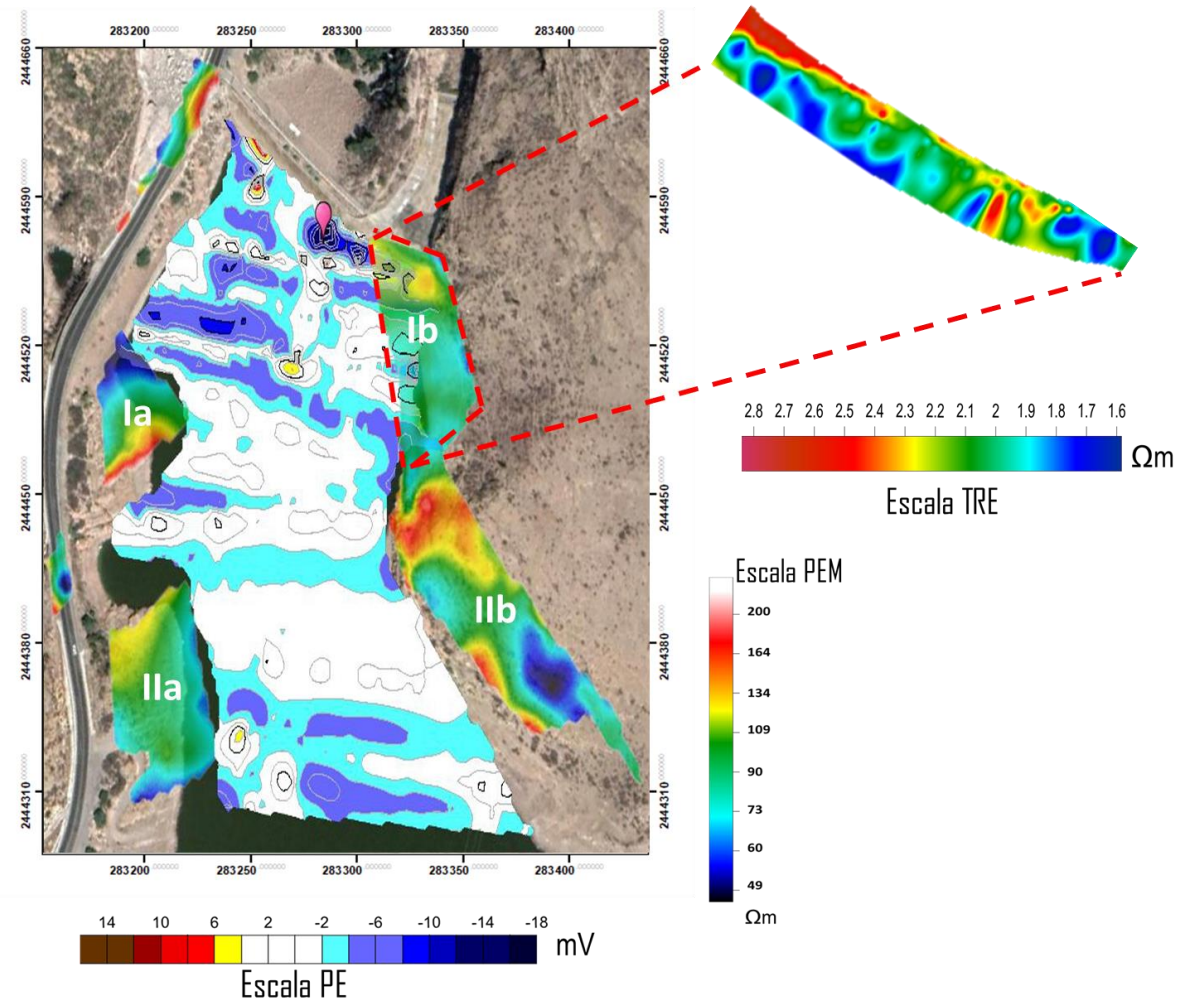
## 4.5 Comparación de resultados de PE, PEM y TRE

El mapa de PE de mediciones sobre el fondo de la presa (Fig.49) muestra zonas con anomalías de baja resistividad (zonas azules) cercanas a la orilla derecha de la presa, abriendo la posibilidad de existencia de zonas de filtración.

Una comparación entre los mapas obtenidos por PE y PEM confirman la existencia de básicamente tres zonas anómalas. Una primera zona anómala de baja resistividad se encuentra cercana a la cortina y vertedor. La otra zona de baja resistividad se encuentra al sur del embalse, mientras que la última zona se ubica al final de las mediciones de PEM de lado derecho de la presa. Si existen anomalías de bajas resistividades en la zona próxima a la orilla, debe corresponder a filtraciones que se encuentran a lo largo de la orilla de la presa.

Por otro lado, realizando una comparativa de los mapas anteriores con la sección de TRE confirman la existencia de la zona anómala de baja resistividad del lado derecho de la presa, catalogada anteriormente como la zona 1.

A pesar que el método PEM es más sensible al ruido electromagnético, su productividad ha permitido tener una distribución de la resistividad hasta una profundidad máxima de estudio de 6 m. Esto ha permitido obtener una descripción litológica del subsuelo y ubicar donde se concentran las anomalías, disminuyendo así, el tiempo y costo de un estudio geofísico. En la figura 57 se muestra el mapa comparativo entre el método PEM, PE y TRE.



### Leyenda

- |                  |  |
|------------------|--|
| Ia Zona anómala  | IIb Zona anómala   |
| Ib Zona anómala  | <span style="border: 1px dashed red; padding: 2px;"> </span> Área de estudio con TRE |
| IIa Zona anómala | <span style="color: pink;">📍</span> Obra de toma                                     |

Figura 57. Mapa comparativo entre método PEM, PE y TRE

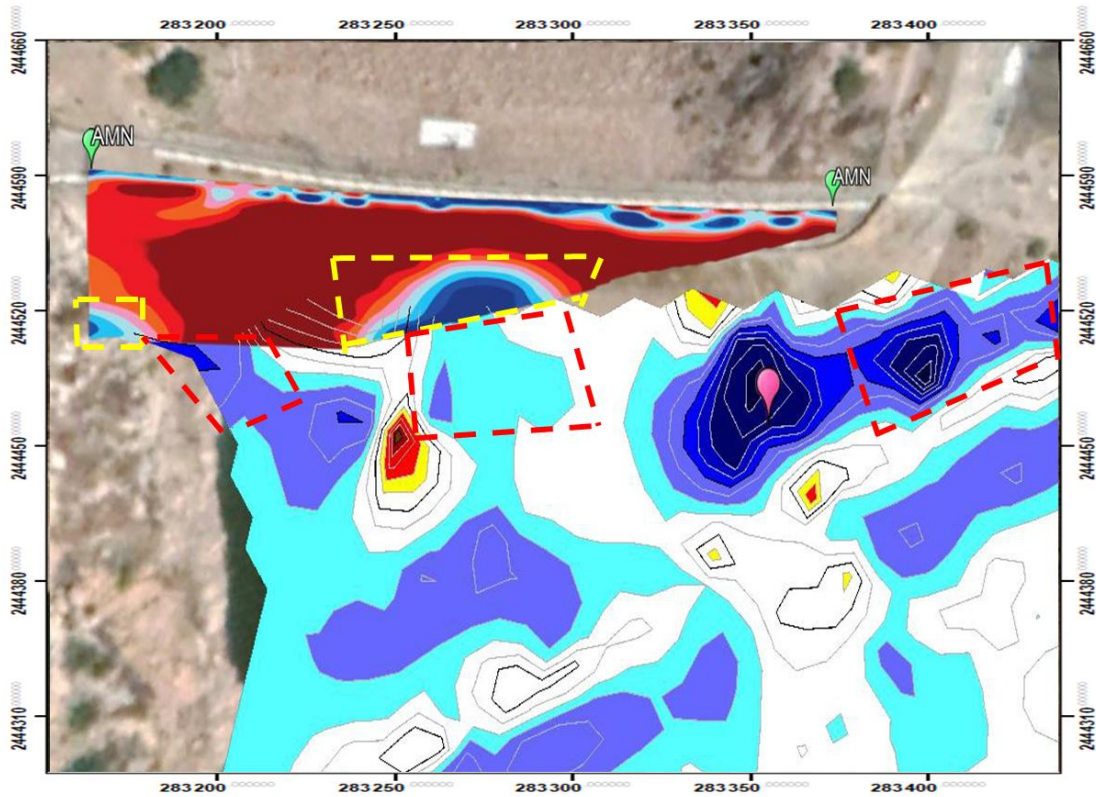
La sección de tomografía obtenida con TRE (Fig.51) muestra zonas con anomalías de baja resistividad (zonas azules) cercanas a la cortina y vertedor, generando la posibilidad de existencia de filtraciones.

Una comparativa entre los mapas de resistividad obtenidos por PEM y TRE confirman la existencia de una zona anómala de baja resistividad, ubicada antes y después del cambio de litología, que debe corresponder a zonas de filtración de agua.





#### **4.6 Comparación de resultados de PE y TRE en la cortina**

La sección de resistividad de la corona de la cortina obtenida con TRE (Fig.51) muestra zonas con anomalías de bajas resistividades (zonas azules) en medio de la cortina, abriendo la posibilidad de existencias de zonas de filtración.

Realizando una comparación entre el mapa de PE de mediciones sobre el fondo del embalse y la sección de TRE de la cortina, se confirma la existencia de dos zonas anómalas. Por un lado, la primera se localiza en medio de la cortina con resistividades bajas que se apoyan sobre los potenciales negativos que se presentan en el mapa. Mientras que la segunda se alcanza a apreciar en el extremo derecho de la presa, representada como un área pequeña de bajas resistividades. En la figura 58 se muestra el mapa comparativo entre los métodos PE y TRE.



### SIMBOLOGÍA

-  Distancia del perfil de TRE
-  Obra de toma
-  Zona de anomalías con TRE
-  Zona de anomalías con PE

*Figura 58. Mapa comparativo entre métodos PE y TRE*

Con ayuda de la comparación de los mapas mostrados anteriormente, se pudo determinar las zonas de filtración ubicadas en la presa Gonzalo N. Santos y con ello elaborar un mapa con las direcciones de las filtraciones, dicho mapa se presenta en la figura 59.



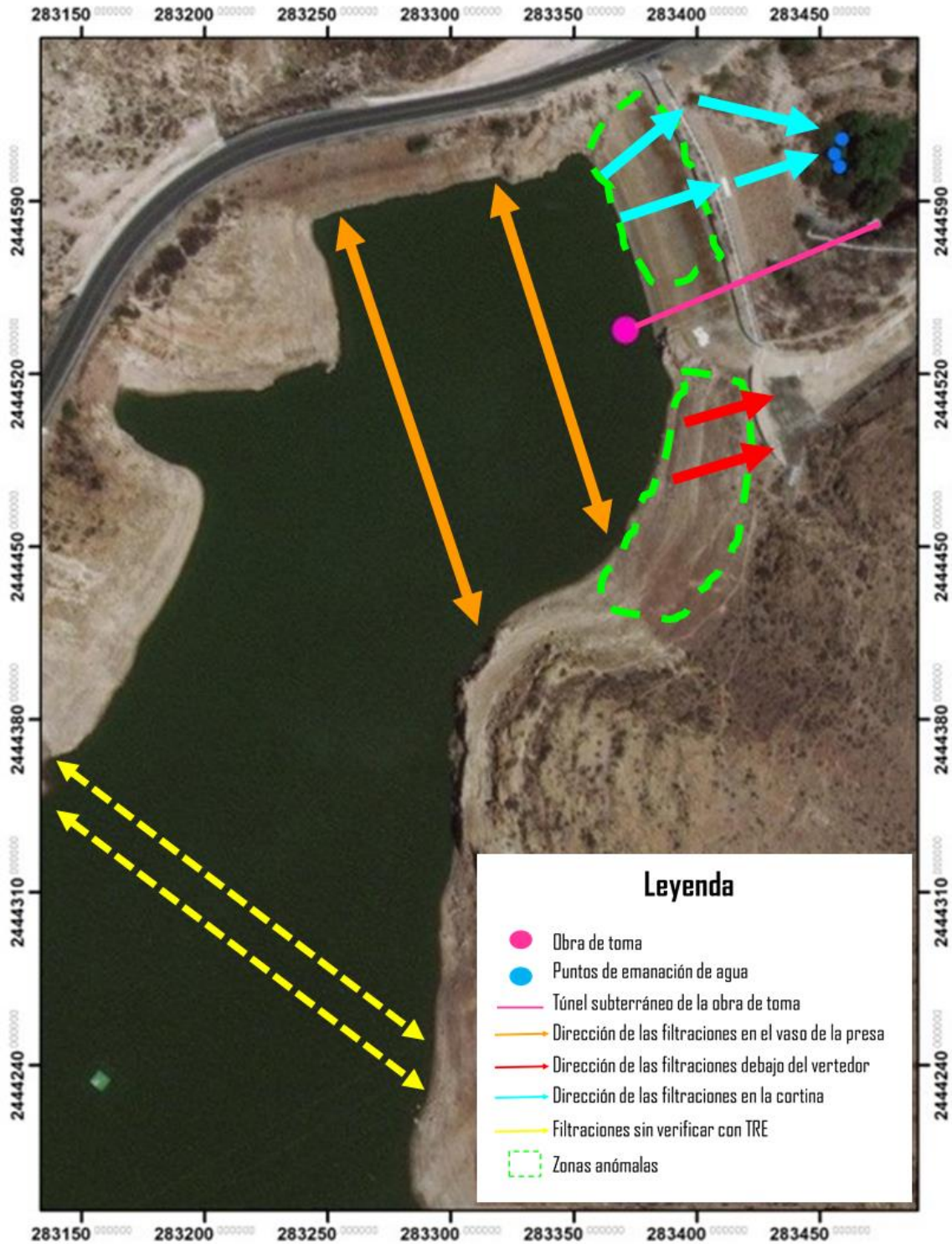


Figura 59. Mapa de las direcciones y ubicaciones de las filtraciones en la presa Gonzalo N. Santos

## **Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones**

Con base en los resultados obtenidos por los diferentes métodos geoelectrónicos aplicados para la detección de filtraciones en la presa Gonzalo N. Santos, del cual trata este trabajo, se concluye.

- Se demostró la efectividad de los métodos geoelectrónicos, en especial del PE, PEM y TRE en la caracterización de las filtraciones de la presa Gonzalo N. Santos, pudiéndose relacionar las zonas de filtración como anomalías de baja resistividad (PEM y TRE) y de potencial negativo (PE).
- Las anomalías obtenidas mediante las mediciones de PE superficial permitieron la caracterización y localización de zonas anómalas próximas a la cortina y en la porción del vaso de la presa donde el tirante de agua era inferior a los 20 m de profundidad. Sin embargo, la relación señal/ruido decreció notablemente en la zona más profunda del vaso de la presa, imposibilitando la delimitación de anomalías de potencial.
- Las mediciones de PE realizadas en perfiles a lo largo del fondo de la presa, aunque con menor productividad que las superficiales, mostraron una alta relación señal/ruido, permitiendo delimitar anomalías de potencial en toda la porción estudiada del vaso de la presa.
- Las anomalías de potencial negativo de PE mostraron en la parte más profunda de la presa, donde existe un cañón o depresión topográfica, dos zonas de infiltración orientadas en las direcciones NW-SE, en concordancia con la morfología y los patrones de fallas de la región, las cuales fueron

confirmadas por anomalías de baja resistividad determinadas por los métodos PEM y TRE.

- Dos zonas adicionales de filtración fueron localizadas en la margen izquierda y centro de la cortina de la presa, respectivamente. Éstas dos zonas se correlacionaron con canales de flujo detectados en la cortina y aguas abajo a partir de los métodos geoelectricos dados por TRE. Tres puntos de afluencia de agua con salinidad similar al agua de la presa fueron localizados aguas abajo en correspondencia con el modelado de los canales de fuga de agua en la cortina.
- Otras dos zonas de filtración en la porción sur del área estudiada del vaso de la presa, fueron determinadas como anomalías de PE, tanto superficiales como profundas, además de estar sustentadas por anomalías de baja resistividad dadas por PEM.

## Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en el presente estudio y en las conclusiones establecidas, se recomienda:

- Informar a las autoridades estatales y municipales de los resultados obtenidos, a fin de que se tomen medidas correctivas en la cortina de la presa, con el propósito de eliminar o disminuir el caudal de agua de fuga en la base de la cortina.
- Continuar estos estudios aguas arriba de la presa cubriendo el resto del área del vaso de la presa.
- Utilizar el método de sondeo electromagnético (AMT) como alternativa al método TRE en zonas de la presa donde la dureza del terreno no permite la inserción de electrodos.
- Incluir estudios de carácter geológico más detallado con el objeto de describir las características del comportamiento dinámico de las fallas que atraviesan la Sierra de San Miguelito.
- Realizar estudios similares en las demás presas del estado de San Luis Potosí o en otros embalses del país donde sus antecedentes y condiciones actuales lo requieran.

---

## **Referencias**

- Acosta, C. (2004). *Las represas hidroeléctricas: desarrollo y su importancia social*. pp. 51-84.
- Andaverde-Arredondo, J.A. (1999). *Determinación de los mecanismos de filtración mediante métodos geólogo-geofísicos en la presa el Cuchillo-Solidaridad China, Nuevo León, México*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Auge, M. (2008). *Métodos eléctricos para la prospección de agua subterránea*. Universidad de Buenos Aires.
- Bracamontes-Morelos, M.A. (2015). *Propiedades eléctricas de roca de yacimientos petroleros mojadas por agua y mojadas por aceite*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cano-Gómez, G. (2007). *Corrientes eléctricas*. Departamento de Física Aplicada III. Universidad de Sevilla.
- Cantos-Figueroa, J. (1987). *Tratado de Geofísica Aplicada*.
- Carrión, F. (1986). *Caracterización de la doble capa eléctrica en las fibras textiles y su influencia en la absorción de tensioactivos*.
- Comisión Federal de Electricidad. (s/f). *Datos generales de la presa Gonzalo N. Santos*.
- Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD/CIGB). (2007). *Las presas y el agua en el mundo. Un libro sobre el papel de las presas en la gestión del agua*.
- Comisión Nacional del Agua. (1998). *Proyecto de adecuación de obras. Planos*.
- Comisión Nacional del Agua. (2004). *Efectuar acciones inmediatas debido a la próxima temporada de lluvias*.

- Davydov, V.A., Baidikov, S.V., Gorshkov, V.Yu., Malikov, A.V. (2016). *Geophysics methods in electrometric assessment of dams*. Power Technology and engineering. Vol. 50, num. 2, pp. 168-175.
- Diaz-Anaya, E. (2010). *Implementación del código Zondres2D para la modelación directa e inversa de datos de tomografía de resistividad eléctrica 2D*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- El, P. (1972). *Capítulo I. Propiedades eléctricas de las rocas*. pp. 5-15.
- Gallos, J., Domingo-Faraco, J. (2005). *O método do potencial espontaneo (SP)-UMA revisao sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicacoes atuais*. Revista Brasileira de Geofísica.
- García, E., Mosiño, P. (1968). *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*. Memoria 1966-67 del comité mexicano para el decenio Hidrológico Internacional. pp. 29-56.
- Golden Software, Inc. (s/f). *Surfer 12 Powerful contouring, gridding and 3D surface mapping*. Full user's guide.
- Guevara-Gasca, V.A. (2007). *Distribución especial y abastecimiento del agua para su uso humano, en el area metropolitana de la ciudad de San Luis: problemática, implicaciones y alternativas*. Tesis de Maestría. Programa multidisciplinario de Posgrado en ciencias ambientales MPCA.
- Iakubovskii, I.U.V., Liajov, L.L. (1980). *Exploración eléctrica*.
- Ikard, S.J., Revil, A., Schmutz, M., Karaoulis, M., Jardani, A., Mooney, M. (s/f). *Characterization of focused seepage through an earthfill dam using geoelectrical methods*.
- IMPACT. (2004). *Review of geophysical monitoring methods and techniques. Initial assessment and conclusions for rapid assessment/application to embankment assessment*. Investigation of extreme flood processes and uncertainty. pp. 1-26.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). *México en cifras*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=24>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1985). *Síntesis geográfica del estado de San Luis Potosí*. pp.25-28.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1986). *Síntesis geográfica del estado de Nuevo León*. pp. 175.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s/f). *Carta Geológica Tepetate*.
- INTERAPAS. (2005). *Estudio de diagnóstico y planeación integral*.
- INTERAPAS. (2012). *Agua en las presas San José, El Peaje y El Potosino, solamente hasta el mes de marzo*. Comunicado de prensa.
- INTERAPAS. (2013). *Gestión del agua en la zona metropolitana de San Luis Potosí, Cerro de San Pedro y Soledad de Graciano Sánchez*. pp. 48.
- Labarthe-Hernández, G. (1978). *Algunos xalapazcos en el Estado de San Luis Potosí*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico 58.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M. (1980). *Cartografía geológica Santa María del Río, S.L.P.* Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aranda-Gómez, J.J. (1982). *Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí*: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Labarthe-Hernández, G., Jiménez-López, L.S. (1992) *Características físicas y estructura de lavas e ignimbrita riolíticas en la Sierra de San Miguelito, S.L.P.* Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 114.
- Ley Federal de Derechos. (2014). Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales.

- Loperte, A., Soldovieri, F., Palombo, A., Santini, F., Lapenna, V. (2016). *An integral geophysical approach for wáter infiltration detection and characterization at Monte Cotugno rock-fill dam (southern Italy)*. Engineering Geology. Vol. 211, pp. 162-170.
- López-Hidalgo, A. A., Heng-Loke, M., Oscar-Fanton, G., Cara-Rubí, E. (s/f). *Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D y 3D)*. Vol. 600, pp.1-36.
- Mainali, G. (2006). *Monitoring of tailings dams with geophysical methods*. Licentiate Thesis. Lulea University of Technology.
- Mainali, G., Pagán-Martínez, P., Cuadra, A., Rozycki, A., Malikov, A.V. (1999). *Potencial Espontáneo*. Vol. 50, pp. 1-26.
- Maldonado-Sánchez, G. (1997). *Estudio petrográfico de la ignimbríta cantera, Campo Volcánico de San Luis Potosí, SLP*.
- Morengo-Mogollón, H. (1996). *Análisis de riesgo en presas, estadísticas y parámetros de referencia*. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XI, núm. 2, pp. 65-77, mayo-agosto de 1996.
- Morengo-Mogollón, H. (s/f). *Estado actual y futuro de las presas en México y en el mundo*. Academia de ingeniería de México.
- Martínez-Pagán, P., Aracil-Ávila, E., Faz-Cano, A. (2003). *Técnicas geoeléctricos para la detección y monitorización de filtraciones en embalses*. pp. 62-64.
- Memoria descriptiva de la presa Gonzalo N. Santos "El Peaje". (1998). Municipio de San Luis Potosí.
- Monge, M.A., Begoña, S. (2014). *Corriente eléctrica*. Artículo Universitario. Vol. 2521, pp. 19.
- Moore, J., Glaser, S. (2006). *The self-potential response during hydraulic fracturing of Sierra Granite*. Environmental Engineering.



- Nieto-Samaniego, A.F., Alaníz-Álvarez, S.A., Camprubi í Cano, A. (2005). *La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen conmemorativo del centenario temas selectos de la geología mexicana. Tomo LVII, núm. 3, 2005, pp. 285-318.
- Nzumotcha-Tchoumkam, L.A., Chouteau, M., Giroux, B., Rivard, P., Salen, K., Cote, A. (2013). *A case study of the self-potential methods to characterize seepage and earth dam materials*. pp. 943-948.
- Panthulu, T.V., Krishnaiah, C., Shirke, J.M. (2000). *Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods*. Engineering Geology. Vol. 59. Pp. 281-295.
- Patrick-Bérubé, A. (2004). *Investigating the streaming potential phenomenon using electric measurements and numerical modelling with special reference to seepage monitoring in embankment dams*. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology.
- Presa Gonzalo N. Santos. (s/f). Datos generales.
- Puente-Castillo, W.L. (2014). *Estudio geotécnico y de peligro geomorfológico de una porción de la Sierra de San Miguelito, SLP*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Ramírez-Luna, J. (2016). *Estudio geofísico en cavidad de la delegación Álvaro Obregón usando tomografía de resistividad eléctrica*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Revil, A., Jardani, A. (2013). *The self-potential method. Theory and applications in environmental geosciences*.
- Rodríguez-Ríos, R., Tristán-González, M., Aguilón-Robles, A. (2013). *Estructura y geoquímica de un grupo de domos dacíticos del norponiente del campo volcánico de San Luis Potosí, México*. Boletín de la sociedad geológica mexicana. Vol. 65, núm. 1, 2013, pp. 109-122.

- Rozycki, A., Ruiz-Fonticiela, J.M., De la Cuadra, A.J. (2006). *Delimitación de las zonas de flujo de agua con el método del potencial espontáneo en el espaldón aguas arriba de una presa.*
- Rozycki, A., Ruiz-Fonticiela, J.M., Cuadra, A. (2006). *Detection and evaluation of horizontal fractures in earths dams using the self.potential methods.* Engineering Geology. Vol. 82, pp. 145-153.
- Sandoval-Yoval, L., Montellano-Palacios, L., Piña-Soberanis, M., Sánchez-Guzmán, L.O. (s/f). *Potencial zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lado a disponer.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Santos-Zavala, J. (2004). *Acción pública organizada: el caso del servicio de agua potable en la zona conurbada de San Luis Potosí.* Diario oficial de la federación. pp. 48.
- Serral-Ordoñez, D.P. (2011). *Caracterización electromagnética. Una aproximación a la geofísica somera, Templo del Sol, Sogamoso (Boyacá).* Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- Servicio Geológico Mexicano. (s/f). *Carta Geológica- Minera Tepetate, San Luis Potosí.*
- Torres-Hernández, J.R., Siebe-Grabach, C., Aguilón-Robles, A., Rodríguez-Ríos, R. (2014). *Geocronología y características geoquímicas de un conjunto de domos riolíticos terciarios en el Campo Volcánico de San Luis Potosí.* Boletín de la sociedad geológica mexicana. Vol. 66, pp. 183-197.
- Tristán-González, M., Aguilón-Robles, A., Barbosa-Gudiño, J.R., Torres-Hernández, J.R., Bellon, H., Lopez-Doncel, R., Rodríguez-Ríos, R., Labarthe-Hernández, G. (2009). *Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí.* Boletín de la sociedad geológica mexicana. Vol. 61, núm. 3, 2009, pp. 287-303.

Vidal-Méndez, E. (2008). *Calculo de la conductividad hidráulica de los acuíferos a partir de la resistividad eléctrica*. *Minera and amp, geología*. Vol. 24, pp. 1-8.

Zúñiga-Lara, R. (2002). *Detección de zonas de riesgo en la ciudad de Guatemala*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.