



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

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

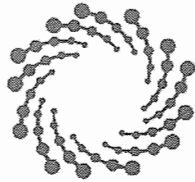
**ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA PROSPECCIÓN DE FUENTES  
ALTERNATIVAS DE AGUA LIBRE DE ARSÉNICO EN EL ÁREA DE  
CERRITO BLANCO, MATEHUALA, SLP.**

**Tesis que presenta  
Karla de Jesús Pérez Hernández**

**Para obtener el grado de  
Maestría en Geociencias Aplicadas**

**Directores de Tesis  
Dr. Omar Delgado Rodríguez  
Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas**

San Luis Potosí, San Luis Potosí (Agosto, 2019)



**IPICYT**

## **Constancia de aprobación de la tesis**

La tesis "***Estudio geofísico para la prospección de fuentes alternativas de agua libre de arsénico en el área de Cerrito Blanco, Matehuala, SLP***" presentada para obtener el Grado de Maestra en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **Karla de Jesús Pérez Hernández** y aprobada el veintiuno 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**  
Codirector de la tesis

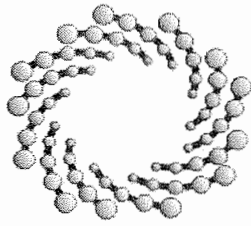
**Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas**  
Codirectora del Comité Tutorial

**Dr. Héctor López Loera**  
Miembro del Comité Tutorial

## **CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto NA140182 (Royal Society). Durante la realización del trabajo la autora recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología - y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. con número de registro 612800.

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



**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 043 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 21 días del mes de agosto del año 2019, se reunió a las 11:00 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>Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

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

**MAESTRA EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó la C.

**Karla de Jesús Pérez Hernández**

sobre la Tesis intitulada:

*Estudio geofísico para la prospección de fuentes alternativas de agua libre de arsénico en el área de Cerrito Blanco, Matehuala, SLP*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas**  
**Dr. Omar Delgado Rodríguez**

El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLA**

Dándose por terminado el acto a las 12:00 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 21 días del mes de agosto de 2019.

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

  
**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico



## DEDICATORIAS

A Dios en agradecimiento por su inmenso amor hacia mi familia y a mí. Y por ser mi guía en todo proceso.

A mi papá y mamá por su amor, por tanto, esfuerzo y sacrificio, a mi hermana Leslie por apoyarme y nunca dejarme sola y ser un gran ejemplo, a mi hermana Dulce por ser tan cariñosa, a mi cuñado Miguel por ser un hermano para mí. A todos ellos porque sin saber el sacrificio que ellos hacían para que yo estuviera bien.

A Mary Chuys por ser mi amiga, siempre apoyarme y aconsejarme con tan buen humor.

A Chuyito porque siempre estuviste para escucharme y explicarme cuando más frustrada me sentía.

## AGRADECIMIENTOS

A mi mamá y papá por estar siempre para mí, a Leslie y Dulce por ser tan amorosas.

A mis amigos Chuyito, Mary Chuys, El muchacho precioso, El Ferminnnnsss, La Chayooos, El Oscardo, El Danis, Angi, Cesario Muñoz, Cesarin El papa luchón, y a Jorge por ayudarme y guiarme cuando no tenía la más mínima idea de qué hacer.

A Deme y a Arte por estar ahí para platicar conmigo.

Al Dr. Omar por ser mi amigo, y apoyarme tanto en el proceso de la Tesis y su grandísima paciencia que tiene hacia mí, gracias Dr. Omar.

Al Dr. Héctor por ayudarme, explicarme y guiarme.

Al Ing. Víctor Julián por explicarme y aconsejarme en la escritura de mi tesis, y del proceso de la vida.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
JUSTIFICACIÓN	9
HIPÓTESIS	9
ANTECEDENTES	10
1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	15
1.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	15
1.2 VÍAS DE COMUNICACIÓN	16
1.3 CLIMA	17
1.4 VEGETACIÓN	17
1.5 HIDROLOGÍA	19
1.5 HIDROGEOLOGÍA	20
1.6 FISIOGRAFÍA	21
1.6.1 GEOMORFOLOGÍA	21
1.6.2 TECTÓNICA	23
1.7 GEOLOGÍA REGIONAL	23
1.7.1 ESTRATIGRAFÍA	25
1.7.1.1 CRETÁCICO INFERIOR	25
1.7.1.2 CRETÁCICO SUPERIOR	27
1.7.1.3 CUATERNARIO	28
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	30
2.1. MÉTODO MAGNÉTICO	30
2.1.1 HISTORIA	30
2.1.2 PRINCIPIOS BÁSICOS	31
2.1.2.1. CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE	31
2.1.2.2. VARIACIONES TEMPORALES DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE	32
2.1.2.3. PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LAS ROCAS	33
2.1.3. FILTROS MATEMÁTICOS	37
2.1.3.1. REDUCCIÓN AL POLO MAGNÉTICO	37
2.1.3.2. DERIVADA EN LA VERTICAL	38
2.1.3.3. CONTINUACIÓN ASCENDENTE	39
2.1.3.4. SEÑAL ANALÍTICA	40
2.2. MÉTODOS GEOELÉCTRICOS UTILIZADOS	40
2.2.1. HISTORIA	40

2.2.2. PRINCIPIOS BÁSICOS	41
2.2.2.1. RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD: LEY DE OHM	41
2.2.2.2. RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS	42
2.2.3. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV)	42
2.2.3.1 FUNDAMENTOS DEL MÉTODO	43
2.2.3.2 DISPOSITIVO ELECTRÓDICOS PRINCIPALES: DIPOLO-DIPOLO, WENNER y SCHLUMBERGER	43
2.2.3.3 TIPOS DE CURVAS de SEV	46
2.2.4. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (TRE).	48
2.2.4.2 DISPOSITIVO ELECTRÓDICOS FUNDAMENTALES:	49
ARREGLO DIPOLO - DIPOLO	49
ARREGLO TIPO WENNER-SCHLUMBERGER	49
2.2.4.3 PROCESAMIENTO E INTEPRETACIÓN 2D DE DATOS DE TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.	50
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE CAMPO	51
3.1. MÉTODO MAGNETOMETRÍA	51
3.1.1. MAGNETOMETRÍA AÉREA	51
3.1.2. MAGNETOMETRÍA TERRESTRE	51
3.1.2.1. EQUIPO UTILIZADO	52
3.1.3. PROCESAMIENTO	52
3.1.3.1. MAGNETOMETRÍA AÉREA	52
3.1.3.2. MAGNETOMETRÍA TERRESTRE	53
3.2. MÉTODO ELÉCTRICO	53
3.2.1 EQUIPO UTILIZADO	53
3.2.2 TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	53
3.2.2 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	54
Figura 3.3. Ubicación de Sondeos Eléctricos Verticales.	55
3.2.4. PROCESAMIENTO	55
3.2.4.1. SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL	55
3.2.4.2 TOMOGRAFIA ELECTRICA RESISTIVA	56
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
4.1 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA RESISTIVA	56
MAPAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	63
4.2 DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	68
4.3 MAGNETOMETRÍA	69
4.3.1 AERO- MAGNETOMETRÍA	69



DOMINIOS MAGNÉTICOS	69
LINEAMIENTOS MAGNÉTICOS	70
4.3.2 MAGNETOMETRÍA TERRESTRE	71
DOMINIOS MAGNÉTICOS	71
LINEAMIENTOS MAGNÉTICOS	72
4.4 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	72
4.5 PERFILES A PARTIR DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	75
4.6 MAPAS A PARTIR DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	80
CONCLUSIÓN	85
ANEXOS	90
COORDENADAS DE LOS PERFILES DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS RESISTIVIDAD	90
COORDENADAS DE LA UBICACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	90
COORDENADAS DE LA UBICACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES.	91

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo Conceptual. (Martínez-Ruiz, 2018: comunicación personal y SGM, 2000	14
Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio y vías de comunicación, en el valle de Matehuala, San Luis Potosí.	16
Figura 1.2. Vegetación en el municipio de Matehuala.	18
Figura 1.3. Hidrología en el municipio de Matehuala.	20
Figura 1.4. Mapa de Geología y Tectónica en el municipio de Matehuala	22
Figura 1.5. Columna geología de la carta Sierra El Azul Clave F14-A35, escala 1: 50,000 Estados de San Luis Potosí y Nuevo León.	24
Figura 2.1. Componentes del campo magnético terrestre. (Lanza y Meloni, 2006)	32
Figura 2.2. Diagrama de la variación secular a través de los años. (Lanza y Meloni, 2006)	33
Figura 2.3. Mediciones de las variaciones del campo geomagnético.	33
Figura 2.4. Comportamiento de tipo materiales según su susceptibilidad, la intensidad de magnetización y la magnetización inducida. (Cantos, 1973)	35
Figura 2.5. Relación que existe entre el campo magnético medido (A), reducido al polo (B).	38
Figura 2.6. Relación entre la distancia de ascendencia y número de onda $L(r)$ . (Geosoft Inc., 2015)	40
Figura 2.7. Desplazamiento posiciones primeras mediciones resistivas. (Siñeriz, 1928)	41
Figura 2.8. Relación entre el voltaje, intensidad y resistividad.	42
Figura 2.9. Medición de la resistencia en un cuerpo cilíndrico	42
Figura 2.10. Principio de un SEV.	43
Figura 2.11. Arreglo tipo dipolo - dipolo	44
Figura 2.12. Arreglo tipo Wenner.	45
Figura 2.13 Arreglo tipo Schlumberger.	46
Figura 2.14. Tipo de Curvas	47
Figura 2.15. Ejemplo de tipo de curva HKQ.	48
Figura 2.16. Arreglo tipo Dipolo - Dipolo.	49
Figura 2.17. Arreglo tipo Schlumberger (Wenner - Schlumberger)	50
Figura 3.2. Mapa ubicación de perfiles de tomografía de resistividad eléctrica.	54
Figura 3.3. Ubicación de Sondeos Eléctricos Verticales.	55
Figura 4.1. Modelo 1 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 1, B) Interpretación geológica del modelo 1.	57

Figura 4.2. Modelo 2 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 2, B) Interpretación geológica del modelo 2.	58
Figura 4.3. Modelo 3 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 3, B) Interpretación geológica del modelo 3.	59
Figura 4.4. Modelo 4 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 4, B) Interpretación geológica del modelo 4.	60
Figura 4.5. Modelo 5 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 5, B) Interpretación geológica del modelo 5.	61
Figura 4.6. Modelo 6 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 6, B) Interpretación geológica del modelo 6.	62
MAPAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	63
Figura 4.8. Mapa obtenido a partir de los modelos de Tomografía de Resistividad Eléctrica, profundidad estimada 0 m. A) Mapa geo-eléctrico, B) Mapa de interpretación geológica.	63
Figura 4.9. Mapa TRE, profundidad estimada 2.5. A) Mapa geo-eléctrico, B) Mapa de interpretación geológica.	64
Figura 4.10. Mapa TRE, profundidad estimada 7.5 m. A) Mapa geo-eléctrico, B) Mapa de interpretación geológica.	65
Figura 4.11. Mapa TRE, profundidad estimada 18.5 m. A) Mapa geo-eléctrico, B) Mapa de interpretación geológica.	66
Figura 4.12. Mapa obtenido a partir de los modelos de Tomografía de Resistividad Eléctrica, profundidad estimada 25 m. A) Mapa geo-eléctrico, B) Mapa de interpretación geológica.	66
Figura 4.13. Mapa TRE, profundidad estimada 32 m. A) Mapa geo-eléctrico, B) Mapa de interpretación geológica.	67
Figura 4.14. Mapa obtenido a partir de los modelos de Tomografía de Resistividad Eléctrica, profundidad estimada 48 m. A) Mapa geo-eléctrico, B) Mapa de interpretación geológica.	68
Figura 4.19 Dominios magnéticos en el área regional.	69
Figura 4.20 Lineamientos magnéticos en el área regional.	70
Figura 4.21 Dominios magnéticos en el área local.	71
Figura 4.22 Lineamientos magnéticos en el área local.	72
Figura 4.23 Sondeo Vertical Eléctrico 1, QQH.	73
Figura 4.24 Sondeo Vertical Eléctrico 5, H.	74
Figura 4.25 Sondeo Vertical Eléctrico 6, HKH	74
Figura 4.26 Interpretación geológica del Perfil 1 de los SEV's; 4,5,6,15.	76
Figura 4.27 Interpretación geológica del Perfil 3 de los SEV's; 9,13,14.	77
Figura 4.28 Interpretación geológica del Perfil 7 de los SEV's; 9,1,10,7,4.	78
Figura 4.29 Interpretación geológica del Perfil 9 de los SEV's; 13,12,11,4.	79
Figura 4.30 Mapa que representa espesor del acuífero en m.	80

Figura 4.31 Mapa de resistividad del acuífero.	81
Figura 4.32 Mapa de resistencia transversal del acuífero.	82
Figura 4.33 Mapa de conductividad longitudinal del acuífero.	83
Figura 4.34 Mapa de espesor de Yesos en la Superficie tomando en cuenta la información aportada por los levantamientos de TRE y SEV.	84

## RESUMEN

En la única concesión de agua otorgada al ejido de Cerrito Blanco para fines agrícolas se ha reportado consistentemente contaminación con arsénico. Por tal motivo, en esta tesis se realizó una exploración geo-eléctrica al sur de Cerrito Blanco en busca de agua subterránea libre de arsénico que pudiera servir de fuente alternativa de agua a dicha comunidad. Para dicho efecto, el objetivo de este estudio fue explorar y modelar mediante Tomografía Eléctrica Resistiva (TRE), Magnetometría Área y Terrestre, así como Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) la zona acuífera al sur de Cerrito Blanco, Matehuala, SLP., para ubicar zonas prospectivas de perforación de pozos y excavación de norias. Los resultados de este trabajo permitieron modelar que, de manera local, el acuífero regional, previamente reportado por CONAGUA e INEGI, en un material aluvial constituido de limo-grava y conglomerado entre el estrato superficial de yesos y la Formación carbonatada El Abra, tiene un techo a una profundidad variable entre 7 m y 30 m y un espesor variable entre 100 y 250 m que pudiera servir de fuente alternativa. Los resultados de este estudio nos permitieron proponer los sitios prospectivos de perforación de pozos profundos y de norias como fuentes alternativas de agua subterránea libre de arsénico.

## **ABSTRACT**

In the unique water concession granted to Cerrito Blanco for agricultural purposes, arsenic contamination has been consistently reported. For this reason, in this thesis work, a geoelectrical exploration was carried out in the area at South of Cerrito Blanco, Matehuala, SLP, in order to find arsenic-free groundwater that could serve as an alternative source of water for Cerrito Blanco community. For this purpose, the objective of this study was to explore and to model the aquifer to locate prospective areas for drilling wells, using the Electrical Resistivity Tomography (ERT), aerial magnetometric map, ground magnetometric survey and Vertical Electrical Soundings (SEV). Results from this study allowed us to model in the study area the regional aquifer, previously reported by CONAGUA and INEGI, as an alluvial material consisting of silt-gravel and conglomerate between a surface layer of gypsum and the carbonate formation El Abra, with a depth of roof variable between 7 and 30 m and a variable thickness between 100 and 250 m. The obtained results to propose prospective drilling sites for wells and shallow-wells as alternative sources of arsenic-free groundwater.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de agua, tanto para consumo humano como para uso doméstico o agrícola, es un problema mundial. Miles de personas sufren de escasez de agua ya sea por la disponibilidad del recurso o por su calidad. La demanda de agua de calidad para consumo agrícola se ha convertido en un problema a nivel mundial, siendo que la agricultura consume aproximadamente el 69% de agua extraída de los mantos freáticos y cuerpos superficiales (FAO, 2018).

En el norte de México existe es creciente el problema de la demanda de agua debido a su poca disponibilidad. En el país existen 653 acuíferos para la administración de aguas subterráneas, los que aportan el 38.9% del volumen total consumido; de estos, 105 se encuentran en condición de sobreexplotación y 32 se encuentran en suelos salinizados en mayor o menor medida (CONAGUA, 2015).

Nuestra zona de estudio se ubica en la cuenca de Matehuala, perteneciente a la región El Salado, lo que a su vez forma parte del acuífero regional Cedral-Matehuala (CONAGUA, 2018), el cual se reporta en condición de déficit.

(Bueno, 2005; Pelallo, 2006; Muñoz, 2008; Briones y Razo, 2008; Rodríguez et al., 2009; Téllez, 2009; González, 2009; Chávez, 2012; Rodríguez, 2016; Ruiz et al., 2017; Hernández et al., 2017; Cordero, 2018; Martínez-Villegas, 2013). Han reportado que la zona enmarcada entre los poblados de Cedral y Cerrito Blanco, en el estado de San Luis Potosí, se han realizado actividades mineras por más de 200 años, sin un adecuado tratamiento de sus residuos. Debido a esto, existe contaminación de suelo y agua por arsénico (As), además de algunos otros elementos como cadmio (Cd), plomo (Pb).

Sin embargo, ya existía una contaminación natural por iones disueltos de las formaciones geológicas como sulfatos ( $\text{SO}_4$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). El As es un elemento tóxico, investigado por diversas asociaciones de salud. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), ubicó al As entre las diez sustancias más peligrosas para la salud humana. A su vez reportan que la exposición prolongada al As por consumo de agua o alimentos contaminados puede causar cáncer y lesiones cutáneas, afectación al desarrollo corporal, enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad, diabetes y neuropatía periférica (OMS, 2018).

Sumado a esto, el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) ha clasificado al As y sus compuestos como carcinogénicos para los seres humanos (CIIC, 2019).

En el poblado de Cerrito Blanco, del municipio de Matehuala, existe una gran contaminación por arsénico tanto en suelo y agua por lo que el agua disponible no cuenta con la calidad adecuada para uso agropecuario (Rodríguez, 2016), las fuentes que proveen el agua desde Matehuala y sus alrededores no cuenta con la calidad mínima requerida para el uso agropecuario, menos para consumo humano (Rodríguez, 2016).

En los terrenos ejidatarios ubicados al sur del poblado de Cerrito Blanco carecen de pozos y/o norias que puedan satisfacer la necesidad de agua. Debido a esto, se decide realizar esta investigación con el propósito principal de proponer zonas donde sea factible explotar el acuífero granular en los ejidos ubicados al sur del poblado de Cerrito Blanco y proporcionar agua libre de As, apta para el uso agropecuario.



## **JUSTIFICACIÓN**

Debido a que la irrigación por agua contaminada causa contaminación en el suelo y es un riesgo a la salud humana se decidió realizar este estudio, proponiendo así zonas prospectivas a perforación para perforación de pozos y excavación de norias dando solución al problema de hídrico.

## **HIPÓTESIS**

Existe un acuífero granular regional, libre de arsénico, al sur del poblado de Cerrito Blanco, Matehuala, SLP, ubicado entre los estratos de yesos superficiales y las calizas de la Formación "El Abra", que es suficiente para satisfacer las necesidades agropecuarias de los terrenos ejidales de la región.

## **Objetivo General**

Explorar y modelar mediante la aplicación de métodos geofísicos la zona acuífera al sur de Cerrito Blanco, Matehuala, SLP., para ubicar zonas prospectivas de perforación de pozos y excavación de norias.

## **Objetivos Específicos**

Modelar los estratos superficiales desde los estratos de yesos hasta la parte superior del acuífero, en las inmediaciones del pozo y norias existentes mediante Tomografía Eléctrica Resistiva (TRE) a fin de correlacionar la estratigrafía con el nivel freático.

Definir los lineamientos principales de las estructuras geológicas en el área de estudio mediante un estudio de magnetometría, que incluya el procesamiento de información aérea y levantamiento terrestre, a fin de coadyuvar en la planeación óptima de un levantamiento de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) que defina no sólo los estratos de sedimentos granulares saturados, sino las zonas de mayor porosidad secundaria dadas por fracturas geológicas.

Modelar la estratigrafía de la zona de estudio mediante un levantamiento de SEV's, en particular la de los sedimentos granulares, para la selección óptima de puntos perforación de pozos y excavación de norias, con fines de aprovechamiento hídrico.

## ANTECEDENTES

El área de estudio se ubica en Cerrito Blanco en las coordenadas externas de los paralelos latitud norte ( $23^{\circ}44'56.28''$  y  $23^{\circ}33'54.55''N$ ) y los meridianos longitud oeste ( $100^{\circ}39'35.32''$  y  $100^{\circ}31'21.90''$ ). Sus zonas aledañas son la ciudad de Matehuala, Villa de La Paz y el municipio de Cedral. En dichas zonas se han realizado varias investigaciones sobre la contaminación por arsénico (As) entre las que se encuentran las de Bueno, 2005; Pelallo, 2006; Muñoz, 2008; Briones y Razo, 2008; Rodríguez et al., 2009; Téllez, 2009; González, 2009; Chávez, 2012; Rodríguez, 2016; Ruiz et al., 2017; Hernández et al., 2017; Cordero, 2018; Martínez-Villegas et al., 2013. A continuación, se da una breve descripción de los principales resultados que se obtuvieron dichas investigaciones, las cuales son consideradas en la presente investigación.

Bueno, (2005) realizó un estudio hidro-geoquímico del Altiplano Potosino, donde reportó altas concentraciones de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ), cloruros ( $Cl^-$ ), nitratos ( $NO_3^-$ ), fosfatos ( $PO_4^{3-}$ ), sodio (Na), por arriba del límite máximo permisible de la NOM-127-SSA1-1994. A su vez, reportó presencia de agua de buena calidad proveniente de manantiales al pie de la Sierra Real de Catorce, con bajas concentraciones de  $SO_4$  y Sólidos Totales Disueltos (STD).

Posterior a este resultado, fue publicado un estudio químico realizado por Pelallo (2006) en los terrenos de una antigua fundidora abandonada en el norte del poblado de Matehuala, SLP, donde evaluaron el comportamiento geoquímico del As y otros elementos traza (Cu) y (Pb) en sedimentos acuáticos contaminados con residuos mineros, que han afectado al agua subterránea del acuífero local. Identificaron los sedimentos como reservorios de estos metales pesados, a su vez identificaron sus mecanismos de movilización, redistribución y fijación o precipitación, entre su fase sólida y de solución. A su vez declaran que los sulfuros forman una parte importante en la fijación del As en sedimentos, los cuales son productos de microorganismos al reducir los sulfatos.

En una zona que, delimitada por los poblados de Cedral y Matehuala, Muñoz (2008) realizó un estudio geológico-geofísico e hidro-geoquímico, donde reporta agua subterránea de alta salinidad, inadecuada para el consumo humano, sin embargo, ésta puede ser usada para actividades agrícolas y ganaderas. Reporta que el material granular que rellena el valle presenta espesores 350 m en el área Vanegas, alrededor de 200 m en Cedral, y un alto estructural al Norte de Matehuala donde el espesor del relleno disminuye a 50 m. En el área de Matehuala los espesores se encuentran entre 250 a 300 m.

Briones y Razo, (2008) reportaron contaminación por As y  $\text{SO}_4^{2-}$  en Matehuala y en una galería de canales excavados en el estrato de yesos que transporta agua desde Matehuala hasta Cerrito Blanco, determinando valores de concentración de As entre 7.5 mg/L y 36.5 mg/L, disminuyendo su concentración durante el trayecto. A su vez, reportan alta contaminación por As en agua superficial y subterránea en la ciudad de Matehuala provocada por residuos de actividad minera.

En una evaluación de riesgo, Téllez, (2009) demuestra la inmovilización de metales pesados por medio de fosfato ácido de calcio hidratado y roca fosfórica. Plantea que existe una contaminación heterogénea en diferentes fases geoquímicas, reportando la existencia en Matehuala y Villa de la Paz de altas concentraciones de As y Pb que sobrepasan el límite permisible de la NOM-199-SSA1-2000, recomendando la remediación del sitio, a fin de reducir riesgo de hiperqueratosis.

González (2009) realizó un estudio hidro-geoquímico del agua subterránea de Cedral-Matehuala, donde identificó que el agua de mejor calidad se encuentra en los bordes de la cuenca Cedral - Matehuala, en donde las aguas circulan a través de las rocas carbonatadas con altos niveles de STD y  $\text{SO}_4^{2-}$  que sobrepasan los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994. Además, en el área de Cedral existen varios pozos con calidad suficiente para uso agrícola. Encontraron algunos aprovechamientos de agua cerca del poblado Cedral y al SE de Matehuala, donde los nitratos se encuentran por arriba de los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994. A partir de muestreos del acuífero determinaron niveles ligeramente elevados de Pb y Cd, por lo que se considera agua contaminada.

Mediante un modelo conceptual de riesgo ambiental en el distrito minero de Santa María de la Paz, SLP, Chávez et al., (2011) reportaron altos niveles de As y Pb, por dispersión y/o emisiones. Estos metales pesados han provocado afectaciones en el medio ambiente que representan un riesgo a la biota y la salud humana. A partir de este modelo identificaron los sitios de mayor potencial de riesgo, los cuales en jerarquía fueron Villa de la Paz y posteriormente Matehuala, por lo que recomiendan una remediación de ambos sitios.

Rodríguez, (2016) realizó un estudio en un área que abarca desde la Sierra Real de Catorce hasta la población de Cerrito Blanco, donde reporta un acuífero somero con orientación W-E. A partir de estudios geo-eléctricos se modeló el acuífero superior a una profundidad entre 0.5 y 3.2 m, en un rango de resistividades de 12 - 38 Ohm.m y a profundidades entre 60 y

342 m, con un rango de resistividad de 21 - 33 Ohm.m y espesores variables entre 11.5 y 100 m.

Ruiz et al., (2017) realizaron una investigación en los cultivos de maíz en Matehuala y reportaron que la práctica recurrente de irrigación a cultivos con agua contaminada por As ha incrementado la concentración del mismo en el suelo y ha causado bio-acumulación en los cultivos de maíz. Mientras que la absorción o coprecipitación del As en calcita y/o yeso puede retener el As en suelos agrícolas y cultivos de maíz, destacando la importancia de comprender mejor la eliminación en suelos y ambientes calcáreos.

Hernández, (2017) determinó que existe una relación directamente proporcional entre el As y la composición relativa de yeso. A su vez, la relación entre las concentraciones de As y calcita en el suelo es inversamente proporcional. Se determinó que el As podría tener un alto potencial de movilidad espacial a través de la disolución de clinoclasa, adamita, arsenolita, farmacolita y haidingerita. Por lo que, recomienda una remediación por confinamiento de residuos, o en su defecto la estabilización de residuos hacia fases de una menor solubilidad.

El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Información INEGI, (2012) realizó un estudio Hidrológico del Estado De San Luis Potosí, donde describen de manera regional el acuífero del Valle de Matehuala - Huizache Abarcando desde la Sierra Real de Catorce hasta Lázaro Cárdenas. Reportando que el material donde se contiene el acuífero es de granulometría heterogénea con un espesor de 350 a 400 m en el centro del Valle. Su permeabilidad la clasifican como buena, y por su funcionamiento lo consideran libre. Describen el comportamiento piezométrico con una elevación de 1500 a 1250 m.s.n.m. Donde el nivel máximo se encuentra en la Ciudad de Matehuala y el mínimo en el Huizache, lo reportan con una dirección N - S. Una profundidad de Nivel Estático de 15 a 20 m el cual profundiza hacia el Sur hasta 90 m en San José de Guajes y sube a 45 m hacia Palo Blanco, profundizando nuevamente a 130 m hacia Pozos Santa Ana al Sur. Sus zonas de recarga son de flujo horizontal ubicadas en Cedral y Sierra de Catorce. Existen 88 pozos en el sitio con un Nivel Estático que varía de 15 a 135 m con un volumen anual de recarga 10 Mm<sup>3</sup> de extracción 12.5 Mm<sup>3</sup> con un déficit de -2.5 Mm<sup>3</sup>/año. Utilizando el agua principalmente en riego, abrevadero, uso doméstico y servicio público urbano. La Comisión Nacional del Agua tiene un estricto control para su uso y manejo ya que está calificado como sobreexplotado y fue declarado como zona de Veda en 1964. Tiene una calidad de dulce a salada con un contenido de Sólidos Totales Disueltos (STD) de 500 - 2500 ppm, calidad

de agua de riego, salinidad media a alta con bajo contenido de sodio, lo clasifican en la familia predominante Cálctica-Bicarbonatada.

Razo et al., (2003) evaluaron el impacto ambiental del arsénico y los metales pesados en un área de 105 km del sitio minero y de Villa de la Paz Matehuala, San Luis Potosí, donde determinaron concentraciones de 19 – 17 384 mg/kg As, 15 – 7 200 mg/kg Cu, 31 – 3450 mg/kg Pb, 26 – 6270 mg/kg Zinc. La concentración máxima de arsénico en el agua pluvial fue de 265 µg/L excediendo 5 veces el (LMP de 50 µg/L). Reporta como caso especial, el área de Cerrito Blanco se encontró la mayor concentración de As en el agua (>5900 µg/L) representando un riesgo grave para la salud. Proponiendo medidas de control y remediación.

Cordero, (2018) realizó un estudio en áreas de cultivo de Cerrito Blanco, donde reporta irrigación en cultivos con agua contaminada por As. A su vez determinó que existe contaminación de As en el suelo a causa de esta irrigación, la cual excede por ocho veces lo permitido, a su vez demostró que esta contaminación migra de manera vertical en el perfil de suelo.

Martínez-Villegas et al., (2013) demostraron que la disolución de compuestos de As en los compuestos de residuos de la fundición abandonada ha causado altos niveles de contaminación en un acuífero localizado en la ciudad de Matehuala, el cual es superficial al de nuestro interés. Represento un modelo para comprender un mecanismo de retención de As.

Estos estudios previos marcaron antecedentes muy importantes del presente trabajo, al presentar el reto de búsqueda de agua libre de As, con la calidad suficiente para satisfacer las necesidades agropecuarias de los ejidatarios en Cerrito Blanco, Matehuala. En base a lo descrito en el marco geológico, tipos litológicos y sus espesores, se elaboró un modelo conceptual, el cual se presenta en la figura 1.

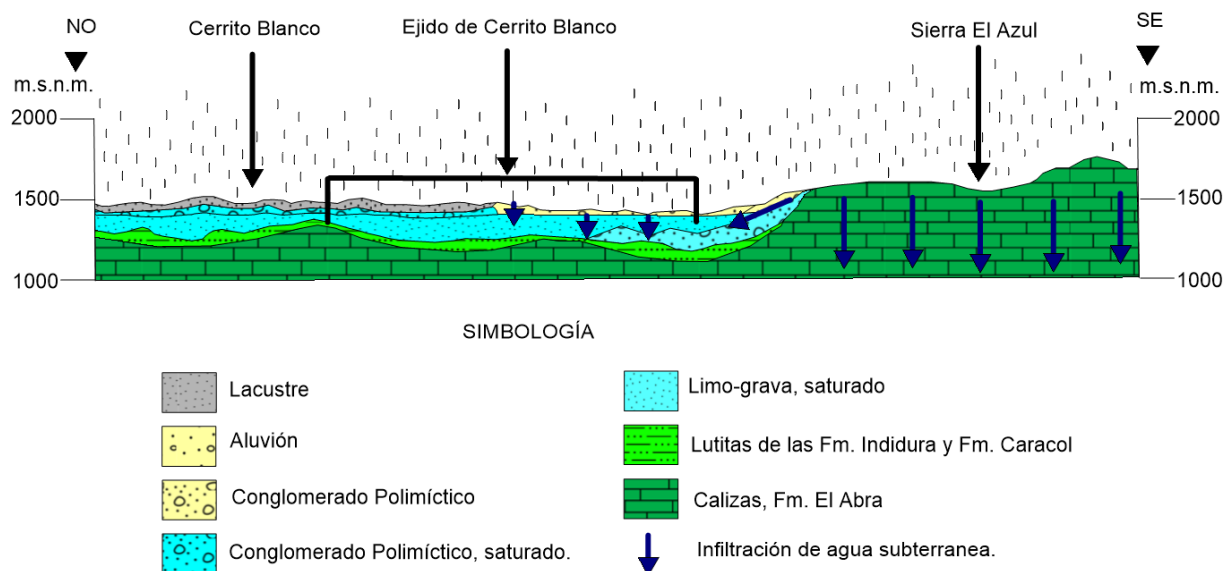


Figura 1. Modelo Conceptual. (Martínez-Ruiz, 2018: comunicación personal y SGM, 2000)

El modelo conceptual de la figura 1 tiene el propósito de identificar las unidades hidroestratigráficas, permeables e impermeables, que limitan el acuífero granular reportado por CONAGUA, (2015), y las zonas por las que se infiltra el agua. Tomando en cuenta estudios geofísicos previos realizados en zonas aledañas a nuestra área de estudio CONAGUA, (2010a, 2010b) Muñoz, (2008) e información geología del SGM, (2000), ambos ya descritos en los antecedentes y marco geológico del presente trabajo, respectivamente, se identificó un estrato de yesos de espesores entre 20 y 70 m, el cual representa un estrato semi-impermeable en la superficie (figura 1). Posteriormente, subyaciendo al sustrato yesífero, se identificó un estrato de conglomerado altamente permeable que yace sobre a un estrato de sedimentos limosos, de baja permeabilidad, frecuentemente intercalado con lentes de conglomerado. Subyaciendo a estos estratos se encuentran estratos impermeables de lutitas y areniscas de la Formación Caracol y las Calizas-Lutitas de la Formación Indidura, a su vez estas formaciones yacen sobre a las calizas de la Formación El Abra donde se estima que pueda existir un acuífero kárstico el cual se recarga mediante las fallas de La Sierra El Azul y los afloramientos de caliza – brecha de la Formación Tamabra, que se encuentran encajonados en las calizas de El Abra.

## **1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **1.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

La zona de estudio es un ejido agrícola llamado Cerrito Blanco, ubicado al sur del poblado de Cerrito Blanco, Matehuala, que se localiza en la región norte (altiplano) del estado de San Luis Potosí. Está comprendida entre los paralelos latitud norte ( $23^{\circ}44'56.28''$  y  $23^{\circ}33'54.55''N$ ) y los meridianos longitud oeste ( $100^{\circ}39'35.32''$  y  $100^{\circ}31'21.90''$ ) en la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental, con una superficie total de 580 ha y una altitud que disminuye en una dirección predominante NW – SE desde un valor de 1520 m.s.n.m. a 1504 m.s.n.m. En la figura 1.1 la zona de estudio se muestra delimitada en un polígono rojo.

## MAPA DE LOCALIZACIÓN Y VIAS DE COMUNICACIÓN

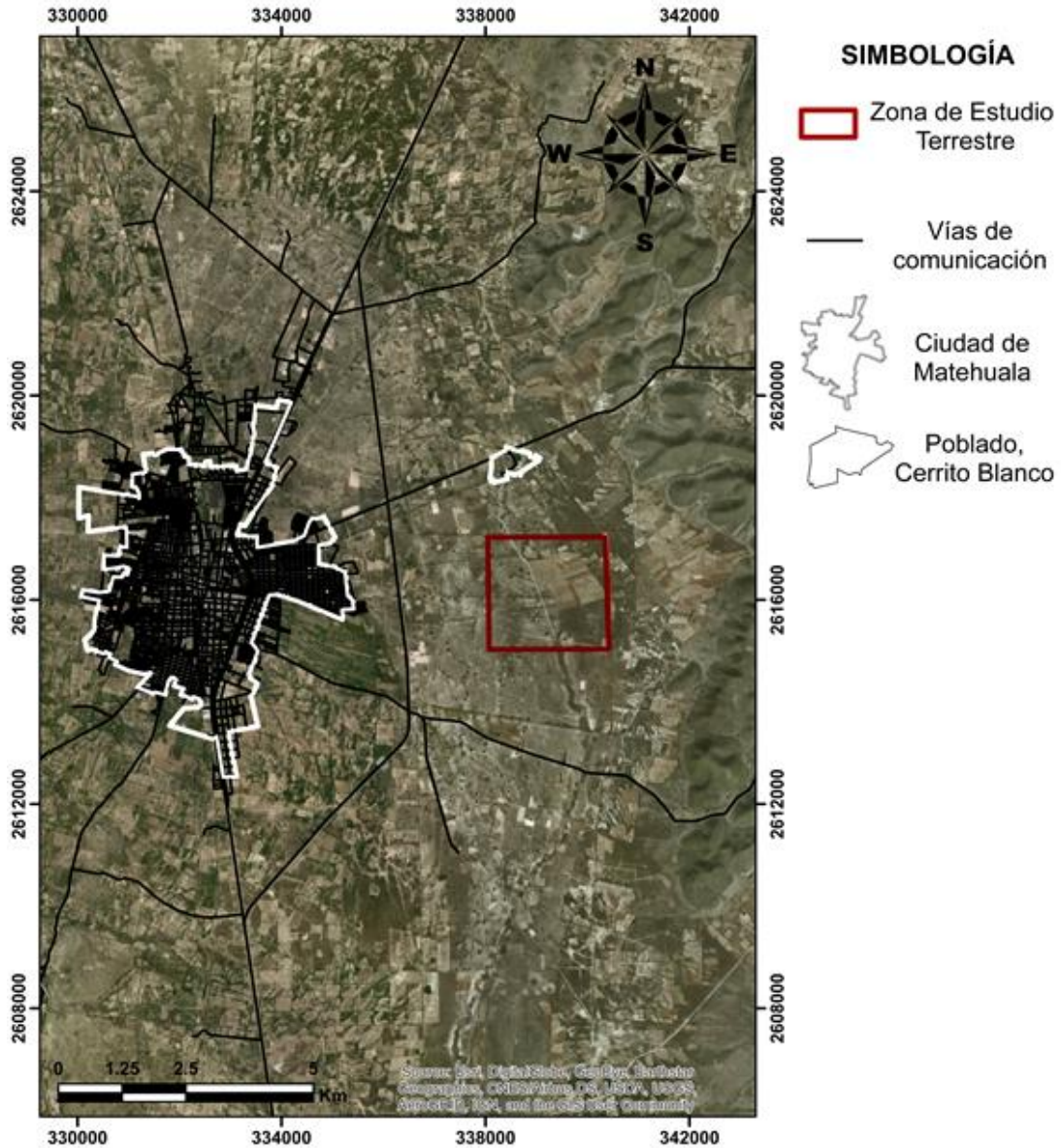


Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio y vías de comunicación, en el valle de Matehuala, San Luis Potosí.

### 1.2 VÍAS DE COMUNICACIÓN

Como principal vía de comunicación se encuentra la carretera federal No. 57 siendo la principal vía de acceso al área estudiada, la cual comunica con los principales centros urbanísticos del país. Tiene un rumbo NW-SE atravesando el área en su parte occidental, quedando la ciudad de Matehuala en la parte septentrional. A partir de la carretera federal No. 57 se desprende la carretera a Doctor Arroyo No. 61, la cual parte del entronque de



Matehuala, comunicando la porción oriental del área con Dr. Arroyo N.L., recorriendo 23 km hasta donde entronca e inicia la carretera estatal N.L. 181. Todas estas vías son mostradas en el mapa de la figura 1.1.

### **1.3 CLIMA**

En el área de estudio predomina el clima seco-semicálido subtipo BSohw (García, 1964) con lluvias en verano y temperaturas promedio mínimas y máximas de 18°C a 22°C, respectivamente, y con una precipitación total anual que varía entre 300 y 500 milímetros, iniciando las mayores precipitaciones el mes de julio y terminan en septiembre, siendo los meses de febrero y marzo los de menor precipitaciones registradas.

### **1.4 VEGETACIÓN**

La presencia de vegetación puede aumentar la población bacteriana y la acidez del agua debido a la descomposición de la materia orgánica procedentes de las plantas que se acumula en el suelo. La acción de las bacterias produce ácido acético, fórmico, oxálico, húmico, etc., que a pesar de ser débiles e inestables llegan a tener una actividad importante. Además, las bacterias fijadoras de nitrógeno crean compuestos nitrogenados que al entrar en contacto con el agua producen ácido nítrico y nitroso los cuales son muy agresivos con las rocas (Fernández et al., 1995). A su vez la temperatura del agua determina su agresividad, ya que su acidez es proporcionada por el CO<sub>2</sub>. A una atmósfera, un litro de agua a 0 °C puede disolver 2.15 L de CO<sub>2</sub>; a 15 °C 1 L de CO<sub>2</sub> y a 25 °C 0.8 L de CO<sub>2</sub> (Llopis, 1970).

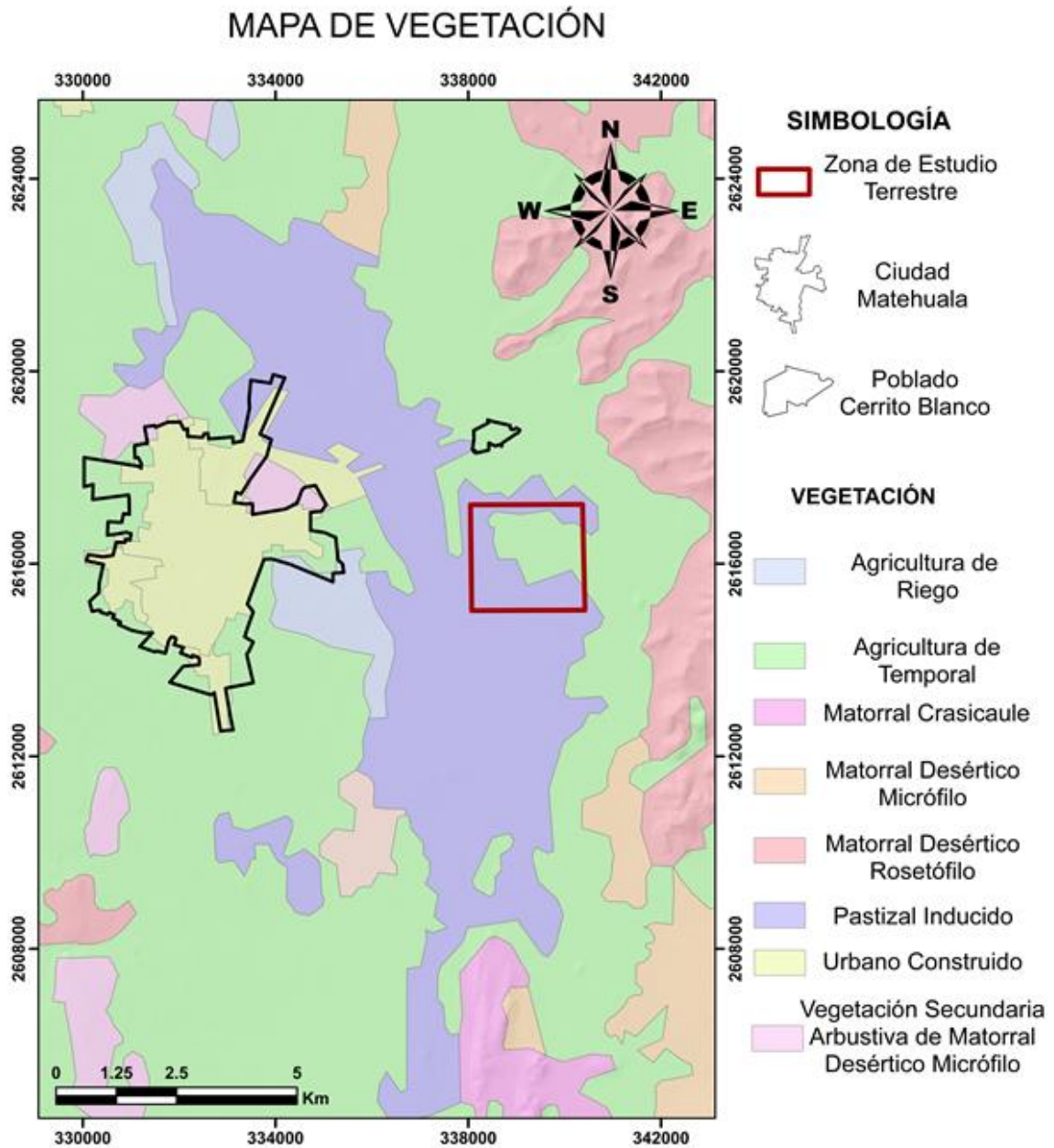


Figura 1.2. Vegetación en el municipio de Matehuala.

En las figuras 1.2 se muestra la vegetación y tipo de suelo presentes en la zona a estudiar. El mapa de vegetación (figura 1.2), se aprecia que la vegetación de la zona de estudio es propia de zonas áridas y semiáridas, generalmente escasa, en la que sobresalen cinco tipos principales: 1. Matorral desértico, caracterizado por tener hoja pequeña y resistente a la sequía, se representa en partes bajas y llanuras. 2. Matorral desértico rosetófilo. 3. Matorral submontano. 4. Pastizal halófilo. 5. Mezquital.

En las zonas semiplanas caracterizando el altiplano en la porción occidental, y en los valles angostos y alargados de la Sierra El Azul se ha desarrollado sembradíos de maíz, frijol, chile y jitomate, por los cuales existe gran necesidad de agua de riego.

### **1.5 HIDROLOGÍA**

La zona de estudio observada en la figura 1.3 queda comprendida en su totalidad en la cuenca Matehuala-Huizache. La hidrografía presenta escaso desarrollo, por lo general las corrientes son activas sólo en época de lluvias y por breves períodos de tiempo (generalmente menos de 2 días), careciendo de corrientes superficiales permanentes, siendo su curso reducido debido a que el agua que conducen se evapora o se infiltra a corto tiempo en los valles o llanuras. El drenaje que se presenta es de tipo dendrítico y en algunas porciones es sub-paralelo debido a la morfología de la sierra El Azul (Soto et al., 2009). Las llanuras no presentan corrientes fluviales de importancia, debido a que en general, desembocan en cuencas endorreicas o bien es frecuente que su desarrollo sea interrumpido por la presencia de bordos (Motilla, 1973).

## MAPA DE HIDROLOGÍA REGIONAL

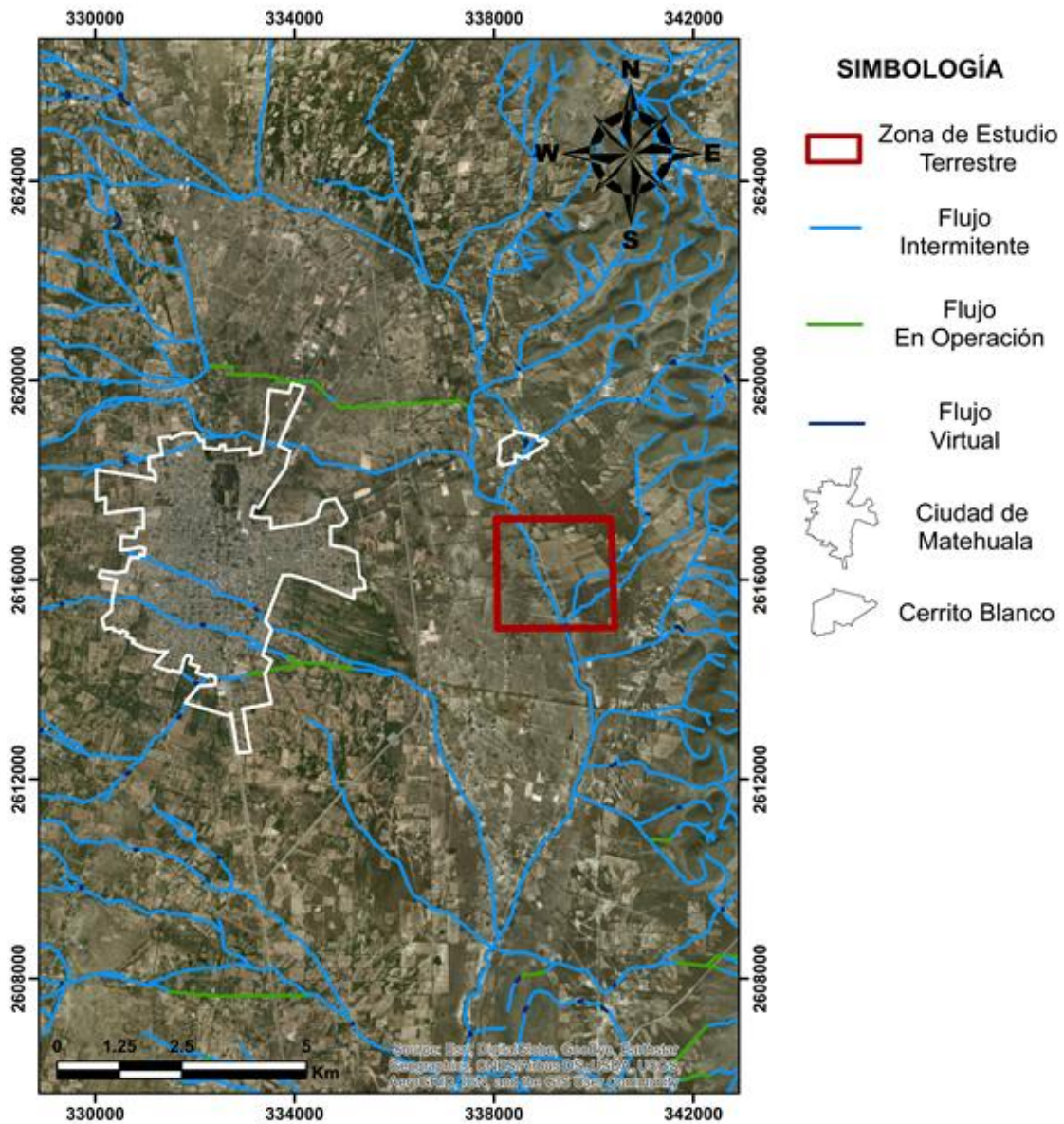


Figura 1.3. Hidrología en el municipio de Matehuala.

### 1.5 HIDROGEOLOGÍA

El tipo de acuífero es tipo libre de acuerdo a CONAGUA, (2015) ya que se encuentra en depósitos aluviales, gravas, arenas, limos y arcillas, realiza recargas por lluvia por medio de las sierras en los depósitos de pie monte

No se cuenta con información de los parámetros hidráulicos del acuífero como transmisividad, conductividad hidráulica o coeficientes de almacenamiento, sin embargo se

han encontrado reportes a las cercanías de Matehuala que mediante pruebas de bombeo se reportan valores de transmisividad de  $0.5 \times 10^{-3}$  a  $8.4 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s el rango de transmisividad lo asocian con materiales de baja a media permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento varió de 0.04 a  $2.3 \times 10^{-3}$  ( CONAGUA, 2015). El Nivel Estático lo reportan entre 10 a 60 m los valores más someros se encuentran en la ciudad de Matehuala entre 10 a 20 m este nivel profundiza hacia el sur debido a que la superficie del terreno tiene mayor elevación. La elevación del nivel estático reportado en la ciudad de Matehuala de 1600 m.s.n.m. disminuyendo hacia el sur 1380 m.s.n.m. hablando de la evolución del nivel estático este varía en un promedio anual del orden de 0.6 m/año sin embargo en un monitoreo realizado en el 2004 se observaron abatimientos, para un periodo de 6 años, ubicándose los mayores abatimientos en el centro del valle y reporta que mediante análisis químicos 500 a 5000 ppm de Sólidos Totales Disueltos (STD) por lo que se deduce que el agua es de mala calidad para consumo humano (CONAGUA, 2015).

## **1.6 FISIOGRAFÍA**

De acuerdo a Motilla, (1973) la zona de estudio pertenece a la subprovincia de las Sierras Bajas de la provincia fisiográfica "Sierra Madre Oriental". A su vez se ubica sobre la Plataforma Valles - San Luis Potosí.

### **1.6.1 GEOMORFOLOGÍA**

Las Sierras Bajas de la Sierra Madre Oriental, donde se encuentra nuestra área de estudio están orientadas al N-S y NE - SW; estas direcciones la forman los ejes de los plegamientos, debiendo su relieve a la deformación de rocas mesozoicas y de su complejo basal, las cuales debido a la Orogenia Laramide fueron levantadas, comprimidas y transportadas hacia el noroeste, formando pliegues y cabalgaduras.

De acuerdo con la descripción morfológica por Motilla, (1973) con formas redondeadas y prominentes, la Sierra El Azul es el sistema montañoso más relevante de la zona con un relieve de moderado a abrupto, con afloramientos de la caliza de la Formación el Abra correspondiente a la Plataforma Valles - San Luis Potosí, alcanzando una altura máxima de 2,600 msnm y una cota mínima de 1,330 msnm. A su vez, Motilla, (1973) menciona que la disolución de la caliza, como roca predominante del área, ha producido pequeñas dolinas y algunos travertinos. En la misma tesis, Motilla, (1973) identifica dentro del ciclo geomorfológico a los abanicos aluviales y las facetas triangulares de la Sierras, ubicadas al Sur de Sierra Madre Oriental en un estado de madurez temprana.



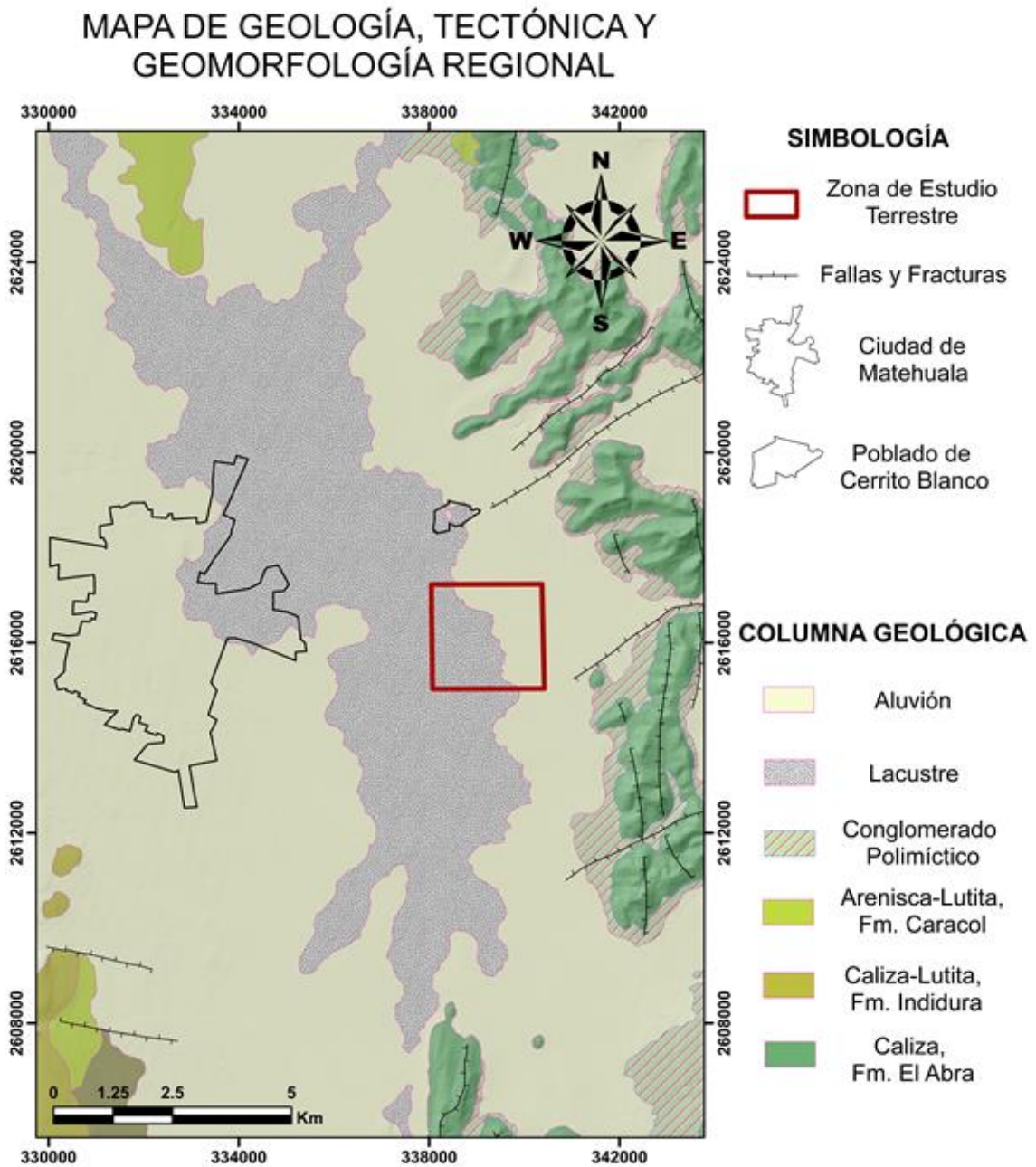


Figura 1.4. Mapa de Geología y Tectónica en el municipio de Matehuala

### 1.6.2 TECTÓNICA



Los movimientos tectónicos de esta área corresponden a los de las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, quedando limitada el área de estudio dentro de la Unidad Paleogeográfica Mesozoica denominada “Plataforma Valles - San Luis Potosí” (Motilla, 1973).

Los movimientos orogénicos de la Revolución Laramide, que se iniciaron al finalizar el Cretácico, efectuaron plegamientos producidos por esfuerzos con direcciones E-W, que además produjeron fallas y fracturas transversales y longitudinales al eje general de las estructuras (Motilla, 1973). En el área, los ejes de los pliegues tienen un rumbo NS y NW – SE; estos siguen la misma dirección que los de la Plataforma Valles - San Luis Potosí. A diferencia de los primeros, presentan un cambio en su dirección debido posiblemente a una masa rígida preexistente de tipo basal que impidió al momento del plegamiento seguir el rumbo general de los ejes de la Plataforma Valles - San Luis Potosí. Dicha masa se localizaría al NW y fuera de la Plataforma antes mencionada (Motilla, 1973). Los plegamientos de la Sierra el Azul dentro del área estudiada están representados por: anticlinales y sinclinales simétricos, asimétricos, buzantes y por plegamientos de tipo “Chevrón” (Motilla, 1973). Las principales fallas en la Sierra El Azul son transversales y se manifiestan entre los pueblos Puerto Dolores y Maravillas, la del Cerro La Peña, al oriente del poblado La Presita, pasando por Tapona y continuando por La Lezna.



## **1.7 GEOLOGÍA REGIONAL**

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias de origen marino del Cretácico Inferior y Cretácico Superior, tal como se muestra en la columna estratigráfica reportada en la carta geológica del Servicio Geológico Mexicano, SGM, (2000) (figuras 1.4 y 1.5).

**SIMBOLOGÍA CUATERNARIO**

-  ALUVIÓN
-  LIMO-GRAVA




**TERCIARIO NEÓGENO-PALEÓGENO**

-  CONGLOMERADO POLIMÍCTICO
-  LACUSTRE

**CRETÁCICO SUPERIOR**

-  ARENSCA-LUTITA
-  CALIZA-LUTITA
-  LUTITA-ARENISCA

**INFERIOR-SUPERIOR**

-  CALIZA-LUTITA
-  CALIZA-BRECHA OLIGOMÍCTICO
-  CALIZA

**COLUMNA GEOLÓGICA**

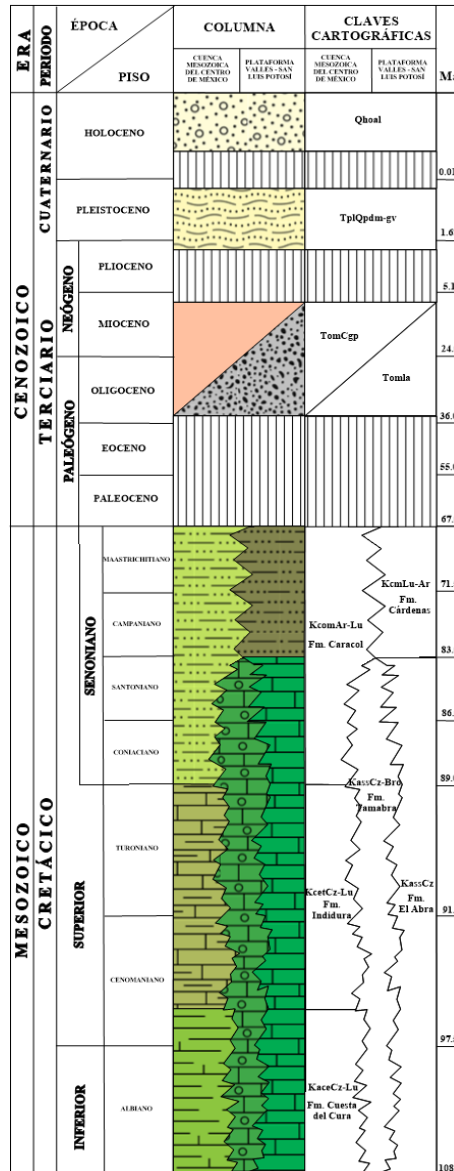


Figura 1.5. Columna geológica de la carta Sierra El Azul Clave F14-A35, escala 1: 50,000 Estados de San Luis Potosí y Nuevo León.

De acuerdo a la descripción que realizó Motilla, (1973), nuestra área de estudio se encuentra dentro de la plataforma Valles - San Luis Potosí. Representando las edades geológicas por diferentes colores. El cuaternario se encuentra representado por los depósitos aluviales que cubren aproximadamente el 50% del área estudiada; estratos de yesos, conglomerados y aluvión que yace sobre a las Formaciones Caracol, El Abra e Indidura. Dentro de la Plataforma Valles - San Luis Potosí, las calizas de la Formación El Abra forman la mayor parte de rocas aflorantes, seguidas por las Arenisca-Lutita de la Formación Caracol. El área comprendida en la Cuenca Mesozoica del Centro de México, la



representan las calizas arcillosas interestratificadas con limolitas calcáreas de la Formación Indidura (Motilla, 1973).

### **1.7.1 ESTRATIGRAFÍA**

Las formaciones antes mencionadas constituyen la estratigrafía del área estudiada, las cuales se describen a continuación en edad, composición, espesor y propiedades hidrogeológicas.

#### **1.7.1.1 CRETÁCICO INFERIOR**

##### **Albiano - Cenomaniano**

##### **Formación El Abra (KassCz)**

La Formación el Abra según Carrillo, (1971) es un complejo calcáreo de tipo plataforma de una edad Albiano - Cenomaniano, este mismo autor reporta mediante exploración de pozos, que la Formación tiene un espesor de 1500 m a 2000 m, mientras que el SGM, (2000) reporta en su carta geológica un espesor de máximo 1000 m. Esta Formación forma parte de la plataforma Valles- San Luis Potosí y de la faja de Oro de la misma plataforma. Esta Formación frecuentemente se correlaciona con la Formación Tamaulipas.

Dicha Formación se subdivide en tres facies principales de edades semejantes;

1. Facies Pre-Arrecifal (equivalente a la Formación Tamabra)
2. Facies Arrecifal (equivalente a la Facies Taninul)
3. Facies Post-Arrecifal (equivalente a la Facies El Abra).

**1. Facies Pre-Arrecifal de la Formación EL Abra**, también llamada (**Formación Tamabra**); es un conjunto litológico de rocas clásticas de talud arrecifal (dolomitizadas o parcialmente dolomitizadas) son calizas clásticas bio-calcáreas derivadas de las zonas arrecifales; o también conocidas como rocas de la Formación Tamabra que se encuentran al oeste de la Faja de Oro. (Carrillo, 1971) Estos sedimentos pre-arrecifales, se hallan expuestos en los cortes más cercano a nuestra zona de estudio, sobre la carretera de Matehuala, S. L. P. - Dr. Arroyo, N. L. Esta facie se subdivide en la parte inferior y la superior; En la parte inferior de la sección, se encuentran calci-lutitas, calcarenitas, dolomitas, pedernal y lutitas de color rojizo y rosa, todas en capas medianas y bien estratificadas, algunas de las capas delgadas de dolomita son bituminosas. Algunas de las unidades más gruesas muestran estructuras de deslizamiento que disminuyen y finalmente desaparecen hacia la cima de cada capa. Estas estructuras primarias fueron producidas

por deslizamientos acuosos de los sedimentos todavía no consolidados. (Carrillo, 1971) La parte superior, consiste en dolomitas y calcarenitas dolomíticas, en capas medianas a gruesas y está presente el pedernal en todo el intervalo. Las dolomitas son bituminosas y el pedernal es laminar. En núcleos de las unidades las capas muestran estratificación gradual y estructuras producidas por erosión y relleno; se encuentran inmediatamente debajo de las capas que contienen estratificación gradual. Todos estos rasgos indican que los sedimentos enunciados representan depósitos en aguas profundas por corrientes de turbidez. La Edad y la correlación de la facie pre-arrecifal con base en su contenido faunístico y posición estratigráfica, son de edad Albiano -Cenomaniano y son correlacionables con la Formación Tamabra (Carrillo, 1971).

**2. Facies Arrecifal de la Formación El Abra (Facies Taninul);** Como "Facies Arrecifal de la Formación El Abra" se designa a la franja angosta de núcleos arrecifales. La franja arrecifal se distribuye que rodeando a la Plataforma Valles-San Luis Potosí es angosta, tiene una anchura que varía de 1.5 km a poco más de 2.5 km. y una longitud que excede a los 1 00 km. Ha sido observada en el frente de la Sierra de El Abra, el frente este y dentro de la Sierra Madre Oriental, en la margen oriental del Altiplano Mexicano. Respecto a la litología y espesor de la Facie Arrecifal de la Formación El Abra en general, está representada por calizas masivas de color crema amarillento y gris crema, constituidas principalmente por un conjunto de bancos arrecifales (de carínidos y radiolíticos), separados uno del otro por calcarenitas, calcarenitas oolíticas y elásticos biógenos; el cementante entre los fósiles generalmente es calcita de grano fino. Estas rocas generalmente son compactas y las únicas zonas porosas se hallan en algunas cavidades dejadas por los fósiles; la porosidad secundaria es producida por lixiviación y fracturas es en grande, desarrollando un complejo sistema de grietas y cavernas, al Oriente de Matehuala, S. L. P. están expuestos más de 300 m. (Carrillo, 1971).

**3. Facies Post-Arrecifal de la Formación El Abra (Facies El Abra);** En un artículo Carrillo, (1971) reporta que es una gruesa secuencia de calci-lutitas, calizas bioclásticas, calcarenitas, toucasias dolomitas y calizas parcialmente dolomitizadas, depositadas sobre una gran plataforma, en aguas cálidas, claras y poco profundas. Su distribución en nuestra área regional de estudio. Las calizas post - arrecifales cubren la porción central de la Plataforma Valles - San Luis Potosí, la parte media oriental del Estado de San Luis Potosí. Son las rocas de más amplia distribución en el área y forman los principales rasgos topográficos. Para fines de esta investigación se describe más la facie post-arrecifal ya que es la que se encuentra en el piso del acuífero estudiado.

El Afloramiento de la Formación El Abra más representativo de nuestra área de estudio, es localizado al norte del área de estudio, en el poblado Cerrito Blanco, en las coordenadas UTM 14Q 338504E - 2618489N. Es un afloramiento aislado de mudstone - wackestone, packstone hasta grainstone y mudstone de bioclastos, de color gris oscuro que intemperiza a tono gris claro, de estructura masiva, con gran cantidad de fracturas rellenas de calcita de color blanco y vetillas color rojizo con presencia de óxidos de hierro. A partir de un estudio petrográfico por el Servicio Geológico Mexicano; reportan abundantes intraclastos que difieren únicamente en la granulometría de fina a muy fina, encontrando escasos microorganismos del tipo foraminíferos y presentó varios hilillos, un 95% de calcita recristalizada y como mineral secundario 5 % de óxidos. Por lo que esta roca se clasificó como un Packstone (SGM, 2000).

### **1.7.1.2 CRETÁCICO SUPERIOR**

#### **TURONIANO**

##### **Formación Indidura (KcetCz-Lu)**

Su litología consiste en calizas arcillosas lajosas de color gris pardo a gris claro violáceo que intemperizada es color amarillo pardo con tintes violáceos en capas delgadas interestratificadas con limolitas de color gris claro (Martínez, 1971). A esta Formación se le asignó una edad del Turoniano debido a su posición estratigráfica y a la fauna existente. (Martínez, 1971). La distribución de esta Formación se observa en una dirección NE-SW. Se observan algunos afloramientos hacia la esquina suroeste de la zona regional de estudio que el SGM, (2010) reporta como un paquete de calizas arcillosas, lutitas calcáreas y limolitas; la caliza es de color gris oscura a negra que intemperizada a un color gris claro a gris crema, las lutitas presentan un color rosa claro que intemperizada en tonos amarillentos, las limolitas presentan tonalidades blanquecinas y rosáceas. En los estratos de caliza se observan nódulos y bandas de pedernal negro principalmente hacia su base, así como fósiles (SGM, 2000).

El afloramiento más cercano a la zona de estudio terrestre se ubica hacia la su esquina suroeste, al sur de la ciudad de Matehuala, en las coordenadas UTM 14Q 330068E - 2607904N. Aflora wackestone de color gris oscuro que ya intemperizada toma un tono amarillento, en estratos gruesos de 0.60 m de espesor; se observan horizontes de lutita en forma laminar, de color amarillo que intemperizada toma un tono blanquecino. Además, se observan nódulos de pedernal color negro. En esta unidad se observa un fuerte fracturamiento y ramaleos de calcita blanca (SGM, 2000).

## **Coniaciano - Santoniano**

### **Formación Caracol (KcomAr-Lu)**

El autor Martínez, (1971) describe esta Formación, como una serie constituida por capas de tobas vitrificadas, lutitas y calizas que yacen sobre la Formación Indidura, con un espesor de 300 m. Esta Formación aflora únicamente hacia los extremos noroeste y sureste del mapa geológico mostrado en la Figura 1.4, en forma de lomeríos bajos, separados del conjunto montañoso por material de aluvión. Se encuentra subyaciendo los derrames basálticos y su contacto está marcado por una zona calichosa (Martínez, 1971). Su litología consiste en lutitas gris verdoso, que intemperizada son de color amarillo ocre, de estratificación delgada, interestratificadas con areniscas de grano medio, cementadas por carbonato de calcio, en capas de 20 a 30 cm de espesor, de color gris verdoso, que intemperizada es de pardo rojizo y amarillo ocre; en ocasiones presenta capas aisladas de caliza microcristalina de grano medio, de color gris verdoso, en capas delgadas. En estos afloramientos no se encontraron fósiles y se le otorgó una edad del Coniaciano – Santoniano (Martínez, 1971).

### **1.7.1.3 CUATERNARIO**

#### **Pleistoceno - Reciente**

##### **Lacustre (Tomla)**

Esta secuencia no ha sido definida formalmente. En la carta geológico-minera llamada El Milagro de Guadalupe, Sánchez et al., (2005) refieren a esta unidad como una secuencia de sedimentos lacustres evaporíticos. Grande, (1968) la denomina informalmente como suelos yesíferos. Los afloramientos de yeso están distribuidos en la porción centro-oeste de la zona regional de estudio. El yeso es de color crema a blanquecino, textura sacaroide y en algunas partes fibrosa, estructura compacta, se presenta generalmente masivo, con presencia de zonas de disolución o karsticidad.

En el área estudiada, debido a que los afloramientos de esta unidad se localizan en áreas de relieve suave o semi-plano, se observó en espesores de alrededor de 20 m, sin embargo, Sánchez et al., (2005) mencionan que en la carta El Milagro de Guadalupe, adyacente a nuestra zona de estudio, se ha reportado hasta 70 m de espesor de yeso en perforaciones de pozos para agua. En una sección llamada Los Pozos Blancos, al occidente de la ranchería Pozos Santa Clara (entre las coordenadas UTM 341336E - 2571915N y 339654E - 2572062N), localizada hacia el sur de la zona de estudio, esta Formación consiste en afloramientos de yeso de color gris blanquecino con tonos leves a castaño en superficie, que intemperizado en tono gris, de textura sacaroideo que en algunas porciones puede

variar a terrosa debido probablemente a la presencia de impurezas (arcillas y/o limo). Posee estructura compacta, escasamente compacta y fracturada, superficialmente con notorias huellas de karsticidad. La zona kárstica posee notorias huellas de disolución, mientras que a más de 2 m de profundidad se llegan a observar niveles o capas de yeso de color castaño oscuro. En esta sección se colectó la muestra SA-031 para análisis petrográfico, donde microscópicamente se observaron yeso como mineral esencial, anhidrita y hematita como minerales accesorios. El yeso constituye el 80 % de la trama y se observa en forma de cristales granulares finos, fibrosos y lenticulares formando el mosaico; la anhidrita se encuentra en el 15% de la muestra y se presenta en cristales lenticulares diseminados en el mosaico de yeso; la hematita constituye el 5% de la trama en forma de pequeños grupos diseminados escasamente en la roca en forma de aglomerado. Se clasificó como una evaporita de origen sedimentario.

### **Conglomerado (TomCgp)**

Esta unidad no ha sido descrita formalmente en la zona de estudio. Sin embargo, en la carta geológico-minera El Milagro de Guadalupe (Sánchez et al., 2005) fue definida como un conglomerado constituido en su mayoría por fragmentos de caliza mal clasificados (cantos rodados, grava y arena), soportados en una matriz arcillosa y cemento calcáreo. Este conglomerado está distribuido al pie de La Sierra El Azul, siendo su espesor máximo estimado de 150 m. Generalmente, el color del conglomerado es gris claro a crema, que intemperizada tiene tonalidades blanquecinas o levemente amarillentas; bien cementado, mal clasificado, constituido por fragmentos sub-angulosos a sub-redondeados, de granulometría variable predominantemente de caliza, aunque llegan a observarse algunos de arenisca, lutita, limolita y/o pedernal, cementados en matriz calcárea o calcárea-arcillosa. Frecuentemente es cubierto por una capa de caliche de menos de 1 m de espesor. Los depósitos de conglomerado polimíctico, son producto de la erosión de las diferentes unidades que constituyen las sierras.

La sección Juan Gómez es la sección más cercana de conglomerado a nuestra zona de estudio terrestre. Se ubica en la porción centro oriental de la zona de estudio regional, en las inmediaciones del rancho Juan Gómez (entre las coordenadas UTM 14Q 353704E - 2592905N y 353027E - 2588129N), aflorando como conglomerado polimíctico de color castaño en superficie que intemperizado es de tono gris a gris claro, de textura clástica, de estructura masiva y compacta, constituido de fragmentos de caliza, pedernal y arenisca, en tamaños de 0.02 a 0.04 m, con un grado de redondez que va de angulosas a sub-angulosas, con una moderada clasificación, soportados por una matriz arcillo arenoso y cementante calcáreo. Este conglomerado cubre discordantemente a las formaciones sedimentarias

cretácicas y es cubierto de la misma manera por depósitos de grava-limo. La edad de esta unidad no se pudo precisar debido a la ausencia de restos fósiles. No obstante, se consideró como Oligoceno-Mioceno con base a que en este intervalo se ha interpretado regionalmente una etapa de extensión que generó fracturas y fallas que dieron lugar a la formación de fosas tectónicas, propicias para el depósito de sedimentos provenientes de las partes altas de las sierras. Respecto a las condiciones geológico-mineras, no se encontraron evidencias favorables para la presencia de minerales de interés económico, en el sector oriental de la carta se han labrado bancos de material en esta unidad, que utilizan en el mantenimiento de caminos de la región.

### **Aluvión (Qhoal)**

El aluvión está cubriendo ampliamente una superficie aproximada de 50% dentro del área. Está constituido por arcillas, limos, arenas, y clásticos mayores, mal cementados por un material yesoso y calcáreo; a profundidad de unas cuantas decenas de metros se obtienen conglomerados bien definidos con clásticos predominantes de caliza, cementados por carbonato de calcio, sulfato de calcio hidratado y materiales como las arcillas. Posiblemente se trate de la Formación El Jabonero, de edad pleistocénica que aflora al norte del área estudiada en el poblado El Salado (Motilla, 1973).

## **CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1. MÉTODO MAGNÉTICO**

#### **2.1.1 HISTORIA**

Es bien conocido que desde la antigüedad la cultura China descubrió las propiedades de los imanes, que utilizaban los generales para guiar a sus tropas a través de la niebla. Posteriormente los cruzados difundieron el conocimiento, llegando este conocimiento hasta los navegantes de barcos, utilizándolos para orientarse de noche o debajo el cielo nublado, lo que permitió a Colón viajar hasta el Oeste buscando el nuevo mundo (Cantos, 1973).

Posteriormente en el siglo 1600 el Dr. Gilbert, físico de la reina Isabel de Inglaterra, publicó un trabajo científico titulado “De Magnete” en el que afirma que la tierra es un gran imán, y fue hasta 1843 cuando Von Wrede utilizó esa propiedad para el descubrimiento de minerales de hierro. En 1875 que Talen escribió un libro titulado “Sobre el uso de mediciones magnéticas en el descubrimiento de los minerales”. A principios de 1900 Symith, de Harvard, realizó varios descubrimientos sobre magnetismo en minería. Y en 1904 Haanel escribió sobre la localización y examen de minerales magnéticos por medio de un magnetómetro (Cantos, 1973).

## 2.1.2 PRINCIPIOS BÁSICOS

### 2.1.2.1. CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

El campo magnético terrestre es dividido en campo magnético interno y externo. El **campo interno** es el de mayor fuerza ya que representa el 97% del total, estando compuesto por: **campo geomagnético**, el cual es un momento magnético tan grande que su única justificación razonable son las cargas eléctricas en el magma; **campo cortical**, el cual se debe a los elementos de la corteza, siendo de nuestro interés y **campo externo**, que es causado por corrientes en la ionosfera el calentamiento diurno solar y las mareas atmosféricas, solo representa el 3% del campo total (Cantos, 1973).

El campo magnético terrestre tiene varios componentes, siendo los principales; componente vertical  $Z$ , componente en dirección al norte geográfico  $X$ , componente en dirección al este geográfico  $Y$  (Lanza y Meloni, 2006). El vector campo magnético terrestre o la dirección de la fuerza  $F$ , la componente horizontal  $H$ , el ángulo de declinación  $D$ , ángulo de inclinación  $I$  (Cantos, 1973; Valle, 1984). Por todo esto se formula la relación  $F^2 = H^2 + Z^2$ . (Cantos, 1973) y otras relaciones como  $\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = F$ ;  $\sqrt{X^2 + Y^2} = H$ . (Lanza y Meloni, 2006). En definición la declinación magnética ( $D$ ), es la diferencia angular entre el norte geográfico o norte verdadero y el norte magnético. Por lo que el ángulo de inclinación ( $I$ ) es el ángulo formado por la componente  $H$  y  $F$ .

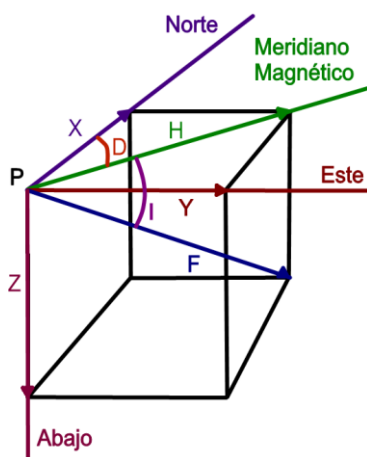


Figura 2.1. Componentes del campo magnético terrestre (Lanza y Meloni, 2006).

### 2.1.2.2. VARIACIONES TEMPORALES DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Las variaciones de la fuerza o la componente  $F$  en campo geomagnético van de escalas de tiempo de segundos a millones de años afectando las mediciones en campo, teniendo que

sustraerse mediante mediciones testigo del campo geomagnético durante un levantamiento de magnetometría.

La variación más antigua que se ha estudiado acerca del campo magnético se ha documentado por miles de años, es la **Variación Secular** esta es una variación global, dependiente del cambio del tamaño y posición del dipolo magnético, por lo que los efectos de estos cambios son predecibles en magnitudes de grados que cambia por periodos de cada cinco o diez años. Basado en registros de datos, existe un modelo matemático con el que se puede predecir esta variación cada 5 años en el vector campo magnético terrestre o la dirección de la fuerza  $F$ , este modelo es llamado Campo Geomagnético Internacional de Referencia (**IGRF**) (Reeves, 2005).

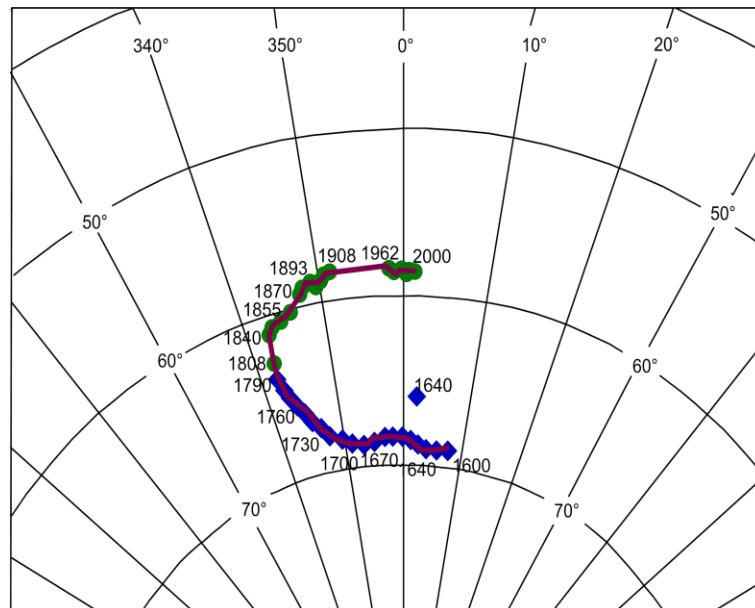


Figura 2.2. Diagrama de la variación secular a través de los años. (Lanza y Meloni, 2006)

**La variación Diurna** está asociada a la rotación de la tierra respecto al sol, variando de manera senoidal, afectada por el viento solar, el cual está cargado de partículas que emanan del sol que distorsionan la variación normal de fuerza  $F$  está oscila alrededor de 30 nT, distorsionado por corrientes ionosféricas en el lado diurno del planeta (Reeves, 2005; Dentith y Mudge, 2014). También depende de la latitud, presentando mayores oscilaciones en las áreas ecuatoriales (Dentith y Mudge, 2014). La variación diurna de la intensidad del campo, afecta las mediciones en campo por lo que tiene que ser monitoreada durante el levantamiento de datos magnéticos (Dentith y Mudge, 2014).



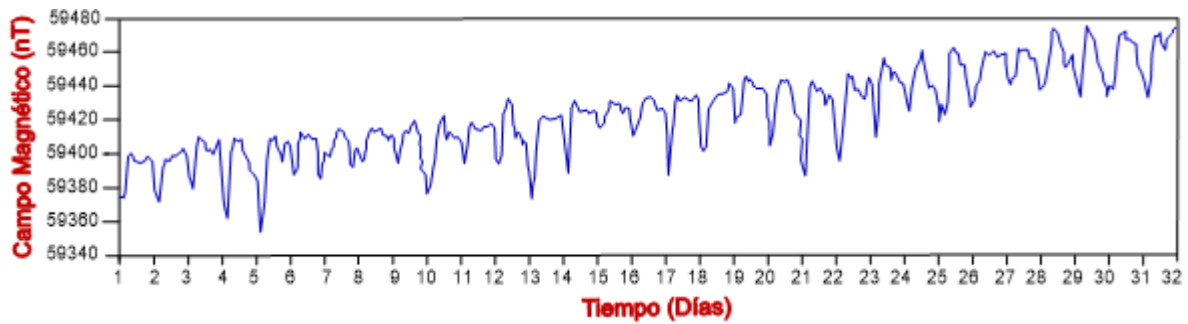


Figura 2.3. Mediciones de las variaciones del campo geomagnético.

### 2.1.2.3. PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LAS ROCAS

La **susceptibilidad magnética** es la relación de la resistencia del magnetismo inducido a la fuerza del campo que lo causó. Como es una relación, no tiene unidades, la cual depende de la permeabilidad magnética  $\mu$  del material de interés, de la siguiente manera:

$$K = \frac{(\mu - \mu_0)}{\mu_0} = \frac{\mu}{\mu_0} - 1 \quad (1)$$

Expresión 1. Donde  $\mu_0$  y  $\mu_R$  son la permeabilidad magnética del vacío y la permeabilidad relativa, respectivamente (Valle, 1984; Cantos, 1973).

La permeabilidad magnética es muy similar a la conductividad eléctrica, explicando cómo puede existir un campo magnético dentro de un material, siendo que para la mayoría de los materiales ferromagnéticos toma un valor de  $\mu = \mu_0$ . Por lo que la permeabilidad relativa  $\mu_R \approx 1$  es muy próximo o igual a uno, en materiales no magnéticos. Por lo tanto, cuanto mayor sea la susceptibilidad de un material y cuanto más fuerte sea el campo externo, más fuerte será el magnetismo inducido en el cuerpo (Cantos, 1973; Tauxe, 2005).

Existen diferentes **tipos de magnetismo**, los cuales se determinan por las propiedades magnéticas de un material, son diferentes situaciones en los átomos y moléculas del material como; los spines de los electrones y sus movimientos en los orbitales en cada átomo, la concentración de átomos magnéticos o iones, la interacción entre los átomos, y la estructura del enrejado molecular. En los **materiales diamagnéticos** los spines de los electrones se alinean, variando el radio y la velocidad de giro de las cargas de los átomos de modo que los dipolos magnéticos se oponen al campo magnético externo, haciendo que el momento magnético del átomo sea nulo, presentando una susceptibilidad negativa. Los

**materiales paramagnéticos** tienen los espines del electrón alineados a sus dipolos magnéticos, cuando estos se alinean con un campo externo se ordenan que refuerzan su acción, por lo que el momento magnético del átomo no es nulo, pero sus momentos magnéticos de los átomos están en todas las direcciones, normalmente muestran una susceptibilidad positiva débil  $k \gg 0$ . Respecto a los **materiales ferromagnéticos** presentan dipolos atómicos que están acoplados magnéticamente a un campo exterior, teniendo como resultado las susceptibilidades más altas (Cantos, 1973).

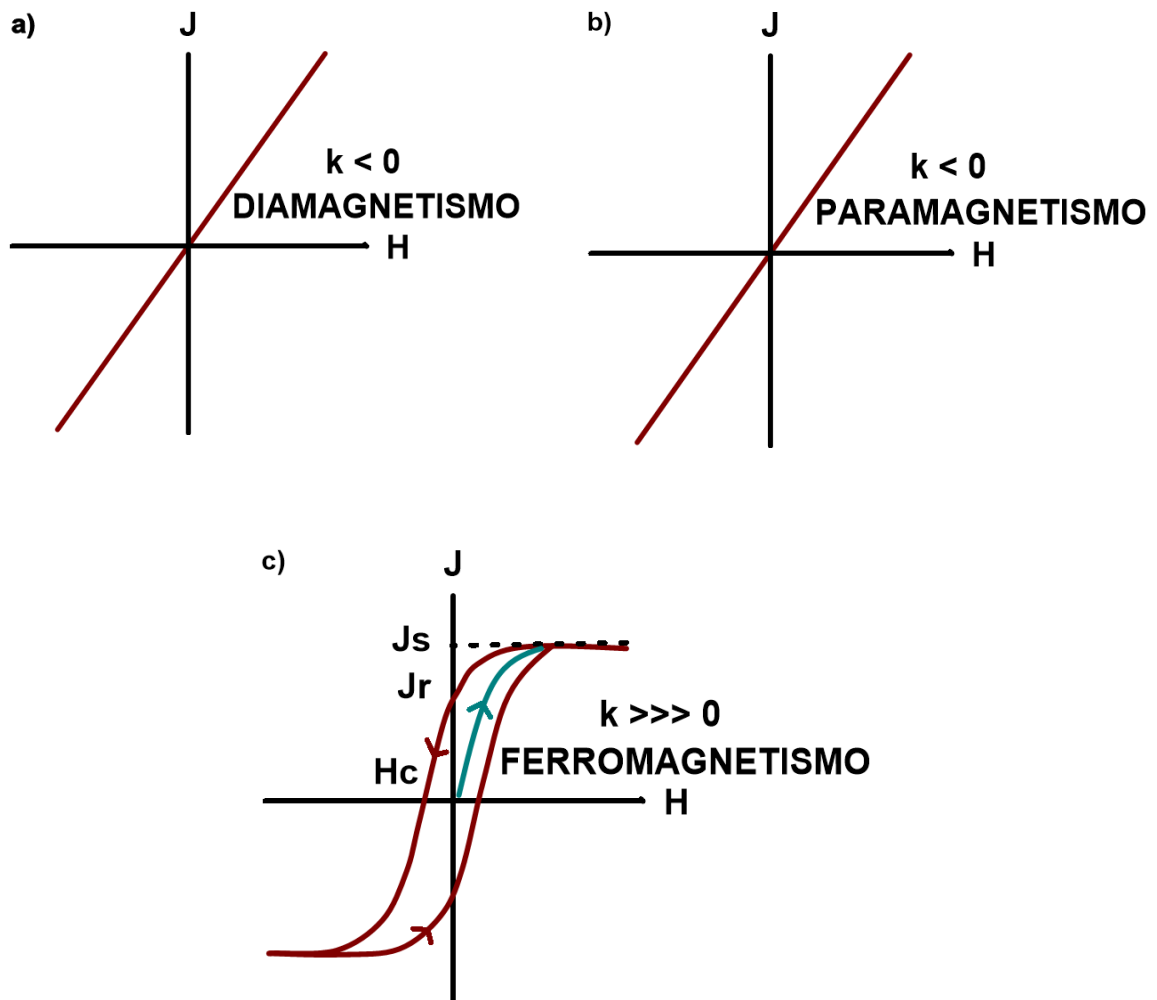


Figura 2.4. Comportamiento de tipo materiales según su susceptibilidad, la intensidad de magnetización y la magnetización inducida. (Cantos, 1973)

La fuerza y orientación de **magnetismo remanente** de las rocas son relacionadas al campo magnético terrestre en el momento de su Formación, también depende del mineral magnético contenido en la roca, de factores como el tamaño de grado magnético y

microestructura. Para una perspectiva geológica, el magnetismo remanente no es verdaderamente permanente, este cambia muy lentamente a largo plazo, con las variaciones del campo magnético de la tierra (Valle, 1984).

El **magnetismo remanente** adquirido en el momento de la formación de una roca se llama **primario**, y el **secundario** se refiere al magnetismo adquirido posteriormente. La adquisición de magnetización para rocas ígneas se produce por mecanismos térmicos, ya que los minerales son magnéticos cuando están por debajo de la temperatura de Curie, en las rocas ígneas o metamórficas se enfrían por debajo de esta. Los dominios magnéticos de los ferromagnéticos son orientados según el campo geomagnético dominante en ese momento quedando registrado en la roca (Cantos, 1973; Tauxe, 2005).

Respecto a las rocas sedimentarias, estas son de gran interés para este caso ya que la geología del sitio está conformada por rocas sedimentarias. A estas se rigen por la **magnetización remanente deposicional (MRD)**, adquiriendo cuando se depositan las partículas de sedimento, se orientan alcanzando la dirección del campo magnético, a su vez inclinación y declinación de este. Posteriormente se rigen por otro tipo de magnetizaciones secundarias, los minerales de grano fino pueden orientarse en los poros de las partículas gruesas por lo que se da la **remanencia post-deposicional (pDRM)**, en el específico caso de precipitación de minerales se lleva a cabo una **magnetización remanente química (MRQ)**. La magnetización más débil que es la de campos recientes es la magnetización **remanente viscosa (MRV)**, disminuyendo cuando el campo cambia o desaparece. (Butler, 2004; Tauxe, 2005;). Por otra parte, es importante definir otros conceptos para un buen entendimiento de resultados como; **dominios magnéticos** se definen como zonas dentro de la configuración de los mapas, anomalías que se identifican por presentar un comportamiento similar en cuanto a sus características de longitud de onda y amplitud (López, 2011). Este comportamiento se debe a que los materiales que componen el subsuelo en dichas zonas tienen propiedades físicas, en su caso de magnetización similares. Por lo tanto, los dominios dependen de la configuración geológica del subsuelo, pudiendo estar conformados por una o varias unidades geológicas. Debido a la configuración de las anomalías magnéticas es respuesta de distintas propiedades físicas de los materiales del subsuelo como la susceptibilidad magnética y los factores geológicos que condicionan su configuración y distribución son distintos.

Por otro lado, es importante definir **lineamientos magnéticos** ya que estos constituyen una flexión o rasgo físico identificable en la superficie terrestre o en su caso en el subsuelo a través de los patrones de anomalías geofísicas, el cual como su nombre lo indica, tiene una

forma lineal, rectilínea o suavemente curvilínea (Leardy et al., 1976). En la interpretación geofísica la presencia de discontinuidades en los materiales de la corteza, es decir fallas geológicas. Estas discontinuidades pueden representar estructuras regionales asociadas a fallas profundas que afectan el basamento o límites de bloques regionales o bien pueden constituir únicamente estructuras someras que afectan únicamente los materiales superficiales de la corteza.

### 2.1.3. FILTROS MATEMÁTICOS

#### 2.1.3.1. REDUCCIÓN AL POLO MAGNÉTICO

La reducción al polo es un filtro que lleva a las anomalías a una inclinación de 90° y declinación de 0°, ubicando a la anomalía sobre el cuerpo causante (Baranov y Naudy; 1964). Este filtro tiene un componente de amplitud y un componente de fase.

El filtro de reducción al polo aplicado por el software Oasis Montaje 8.4, explicado por el mismo software, lleva los datos a una inclinación de amplitud de 90°, aplica el componente a los datos (sin corrección de amplitud), y un valor de 0°, hace que los componentes de fase y amplitud se apliquen en todo el rango. El valor de inclinación de amplitud predeterminado es de 20° en el hemisferio norte. En el hemisferio sur, el valor de inclinación de amplitud es negativo y el valor predeterminado es -20°. (Geosoft Inc., 2015) Esta herramienta supone que las líneas son relativamente rectilíneas y calcula la orientación de cada línea utilizando el primer y el último punto de la línea. La ecuación de este filtro es:

$$L(\theta) = \frac{1}{(\sin I_a + i \cos I \cdot \cos(D - \theta))^2} \quad (2)$$

Expresión 2. Dónde  $I$  = representa Inclinación geomagnética,  $I_a$  = Inclinación para corrección de amplitud (nunca menos que  $I$ ),  $D$  = Declinación geomagnética (Geosoft Inc., 2015).

Para representar la relación que existe entre el campo magnético que se midió y el filtrado por reducción al polo, se observa la figura 2.5, relacionando la latitud magnética observada en campo (A), reducido al polo magnético (B) y el campo de gravedad (C) del objeto que produce la anomalía. La curva (A) tiene una forma compleja y la posición real del objeto está en algunas partes entre el valor mínimo o el valor máximo (Baranov, 1957; Baranov y Naudy, 1964).

La localización a la que realmente pertenece la anomalía depende de la declinación y de la inclinación del campo, y muy importante la dirección en la que se magnetizo el objeto. En la gráfica B el campo terrestre se dirige hacia abajo. La magnetización inducida, también se dirige hacia abajo. En el caso de la gráfica (B), el máximo principal del campo se encuentra sobre el objeto. Así, la posición horizontal de la anomalía se encuentra fácilmente (Baranov, 1957; Baranov y Naudy, 1964).

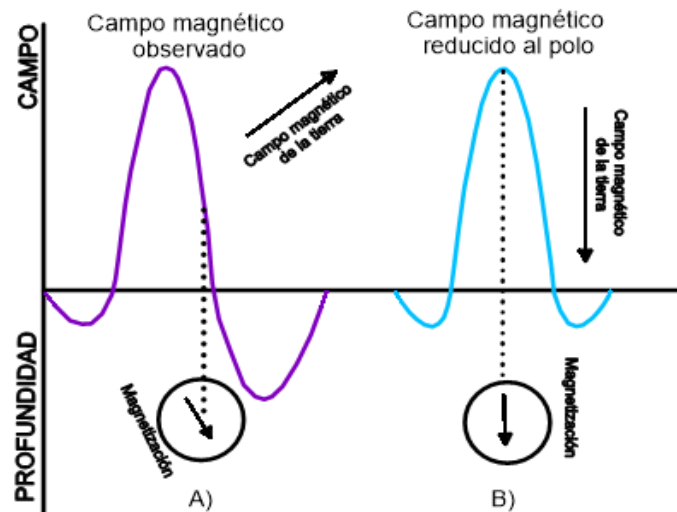


Figura 2.5. Relación que existe entre el campo magnético medido (A), reducido al polo (B).

### 2.1.3.2. DERIVADA EN LA VERTICAL

La primera derivada es el gradiente del campo magnético entre dos puntos medidos de manera vertical a diferente altura y este gradiente se divide entre la diferencia de altura de estos (Henderson y Ziets, 1949). La primera derivada en datos magnéticos es un algoritmo matemático que hace una derivación de manera vertical, realza la información relacionada a altas frecuencias que se encuentra enmascarada por frecuencias bajas que están asociadas a fuentes profundas. Por lo que los datos a partir de este filtro están libres de efectos estructurales regionales o profundos (Henderson y Ziets, 1949). Este filtro comúnmente se utiliza cuando existe una lito-estructural en la que sus anomalías magnéticas se superponen causando una anomalía compuesta, siendo difícil de separar a simple vista en sus diferentes componentes, para ello se aplican los filtros de separación de las derivadas verticales (Henderson y Ziets, 1949). Por lo tanto, este algoritmo resalta anomalías de altas frecuencias, por lo que define rasgos litológicos y estructurales superficiales, incluyendo fallas geológicas, contactos geológicos verticales y sub-verticales (Henderson y Ziets, 1949).

El filtro que aplica el software Oasis Montaje 8.4, es una derivación general que permite la derivada en cualquier grado direccional deseado. Esta se basa en la fórmula;

$$Gradiente = \frac{(\partial f / \partial x \sin \theta + \partial f / \partial y \cos \theta) \cos \varphi + \partial f / \partial z \sin \varphi}{\sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2 + (\partial f / \partial z)^2}} \quad (3)$$

Expresión

3. Dónde;  $\varphi$  es la inclinación,  $\theta$  es la declinación de la dirección.

Si  $\varphi = 0$ , entonces el gradiente se reduciría al componente horizontal del campo y tiene su sensibilidad de dirección máxima a lo largo de  $\theta$ .

Si  $\varphi = 90^\circ$ , el gradiente se reduce al componente Z del campo sin tener polarización direccional (Geosoft Inc., 2015).

### 2.1.3.3. CONTINUACIÓN ASCENDENTE

Este filtro se resaltan los efectos de las fuentes profundas, transformando los datos medidos a una cierta distancia de la superficie, a una altura mayor, alejada de la fuente, lo que disminuye el gradiente de los datos, proporcionando una imagen del campo regional dado por estructuras más profundas (Henderson, 1970). Es considerado un filtro limpio, porque produce muy pocos efectos secundarios que requerirán la aplicación de otros filtros o procesos para corregir. Debido a esto se usa para eliminar o minimizar los efectos de las fuentes superficiales y el ruido en las redes (Geosoft Inc., 2015). A su vez es utilizado cuando se requiere unir datos o comparar datos que fueron medidos a diferentes altitudes, ofreciendo la posibilidad de transformar los estudios individuales realizados a diferentes altitudes transformándolos a una sola altitud, para que puedan ser comparados (Blakely y Simpson, 1986). Para realizar este filtro el algoritmo más utilizado en geofísica de potenciales es la transformada rápida de Fourier aplicando la siguiente fórmula, limitándose a aplicaciones nivel – nivel:

$$L(k) = e^{-2\pi hk} \quad (4)$$

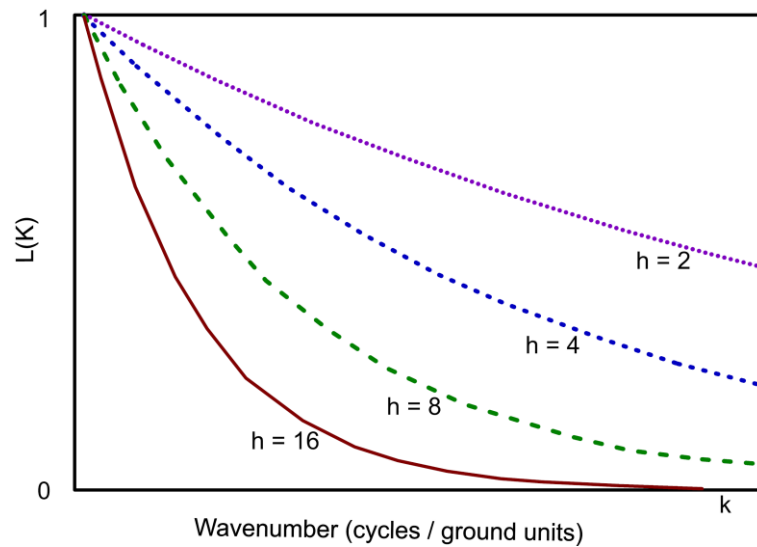


Figura 2.6. Relación entre la distancia de ascendencia y número de onda L(r). (Geosoft Inc., 2015)

Donde; h = unidades de distancia de ascendencia a la superficie, r = número de onda (radianes/unidad de longitud).

#### 2.1.3.4. SEÑAL ANALÍTICA

Este filtro resalta los bordes de las estructuras geológicas causantes de las anomalías magnéticas. Las discontinuidades geológicas pertenecientes a mediana a corta longitud de onda. Siendo independiente a la dirección de cualquier campo potencial (Nabiaghian, 1972, 1974). Su fórmula es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivadas parciales X, Y, obteniendo el valor absoluto de la señal magnética.

$$|A(x,y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial F(x,y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F(x,y)}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F(x,y)}{\partial z}\right)^2} \quad (5)$$

Expresión 5. Donde, A (x, y) = señal analítica y F (x, y) =0 campo magnético (Geosoft Inc., 2015).

## 2.2. MÉTODOS GEOELÉCTRICOS UTILIZADOS

### 2.2.1. HISTORIA

Las primeras publicaciones sobre medidas geo-eléctricas data de alrededor del año 1900, cuando, en Estados Unidos, Brown inventó un procedimiento basado en medidas de resistencia eléctrica a lo largo de un perfil, en dos puntos A y B del suelo, situados a cierta

distancia uno del otro, desplazando las posiciones A y B (A' y B', B'' y A'', A''' y B'''). Figura 2.7 (Siñeriz, 1928).

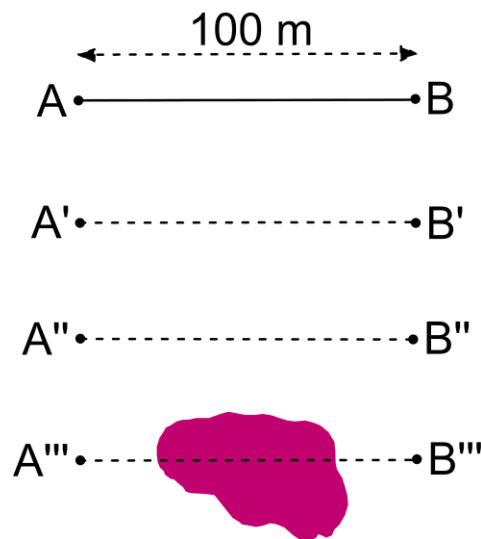


Figura 2.7. Desplazamiento posiciones primeras mediciones resistivas. (Siñeriz, 1928)

Por lo tanto, si notaban una disminución en la resistencia como en la medida A''' y B'', concluían que en el subsuelo había alguna masa conductora (Siñeriz, 1928).

## 2.2.2. PRINCIPIOS BÁSICOS

### 2.2.2.1. RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD: LEY DE OHM

El principio físico de los métodos geo-eléctricos, es la ley de Ohm que relaciona la diferencia de potencial ( $V$ ) medido en Volts, y la corriente eléctrica ( $I$ ) con unidades en Amperes, y complementado la ley con la resistencia eléctrica ( $R$ ) dada en Ohm (Cantos, 1973). La relación entre estos se representa en la figura 2.8.

$$V = R I \quad (6)$$



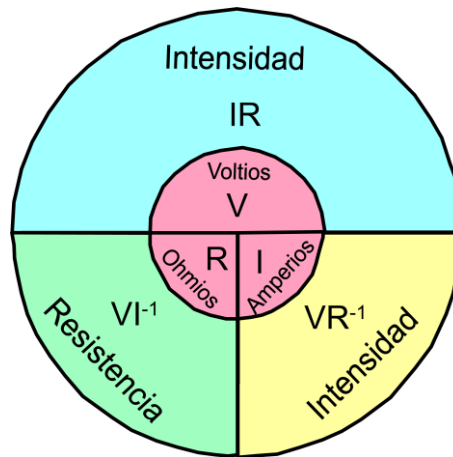


Figura 2.8. Relación entre el voltaje, intensidad y resistividad.

### 2.2.2.2. RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

La **resistividad** es uno de los parámetros más importantes en los métodos geo-eléctricos, la cual se define como la dificultad u oposición que presenta un cuerpo para la corriente eléctrica pueda atravesarlo, descrito técnicamente es; la **resistencia** ( $R = \text{Ohm}$ ) medida en un cuerpo de forma cilíndrica o prismática eléctricamente uniforme de dos caras opuestas a cierta longitud ( $L = m$ ) de una sección ( $S = m^2$ ) de área y resistividad ( $\rho = \text{Ohm.m}$ ) siendo un coeficiente que depende de la naturaleza y estado físico del cuerpo (Orellana, 1982). Por lo que la **conductividad** ( $\sigma = \text{s/m} = \text{Ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$ ) es el inverso a la resistividad, siendo la medida de la capacidad que tiene cualquier material para dejar pasar corriente eléctrica a través de él (Cantos, 1973; Reynolds, 1998), por lo que se relacionan mediante la siguiente ecuación;

$$\rho = \frac{RS}{L} \quad \sigma = \frac{1}{\rho} \quad (7)$$

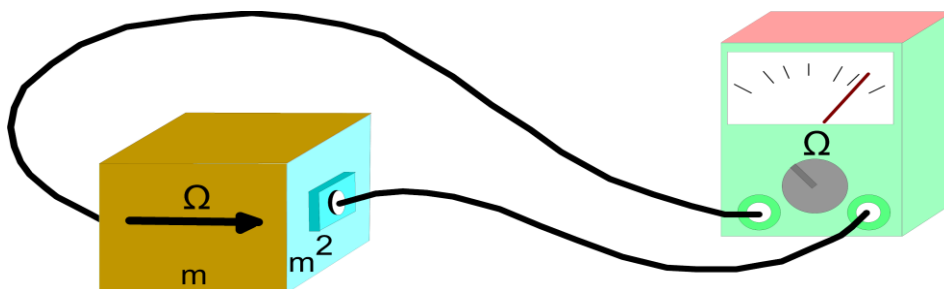


Figura 2.9. Medición de la resistencia en un cuerpo cilíndrico

### 2.2.3. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV)

Este método mide la distribución en profundidad de la resistividad aparente desde un punto fijo de la superficie, hasta una profundidad máxima según penetre la corriente en el medio geológico. Este método consiste en inyectar corriente continua por medio de dos electrodos llamados A y B, y por medio de otros dos electrodos llamados M y N se mide la diferencia de potencial que fue creada por los electrodos A y B (figura 2.10). Conforme los electrodos A y B se van separando, la penetración de la corriente eléctrica aumenta, llegando a capas geológicas más profundas, por lo que los valores obtenidos de  $\rho_a$  corresponden a profundidades mayores conforme se incrementa la distancia entre A y B (Mussett y Aftab, 2009).

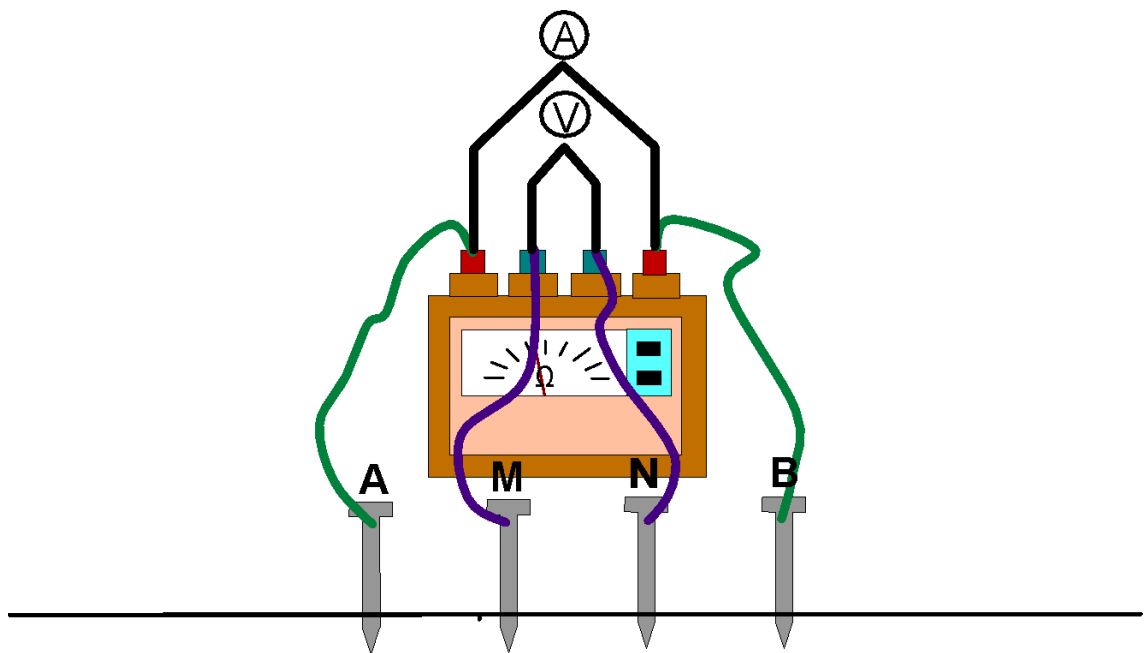


Figura 2.10. Principio de un SEV.

#### 2.2.3.1 FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

#### 2.2.3.2 DISPOSITIVOS ELECTRÓDICOS PRINCIPALES: DIPOLO-DIPOLO, WENNER y SCHLUMBERGER

Existen diferentes arreglos electródicos para realizar los SEV's, los cuales se seleccionan de acuerdo con las características de sitio y los objetivos de estudio. Los arreglos más utilizados son: Wenner, Schlumberger y Dipolo - Dipolo.

En el arreglo **Dipolo - Dipolo** la distribución de los electrodos es **A-B, M-N**. En este arreglo, una mayor profundidad de la penetración de la corriente se obtiene aumentando la distancia entre los centros de los dipolos A-B y M-N, siendo la longitudes de ambos dipolos la misma y su separación debe ser un múltiplo de esa longitud (Mussett y Aftab, 2009).

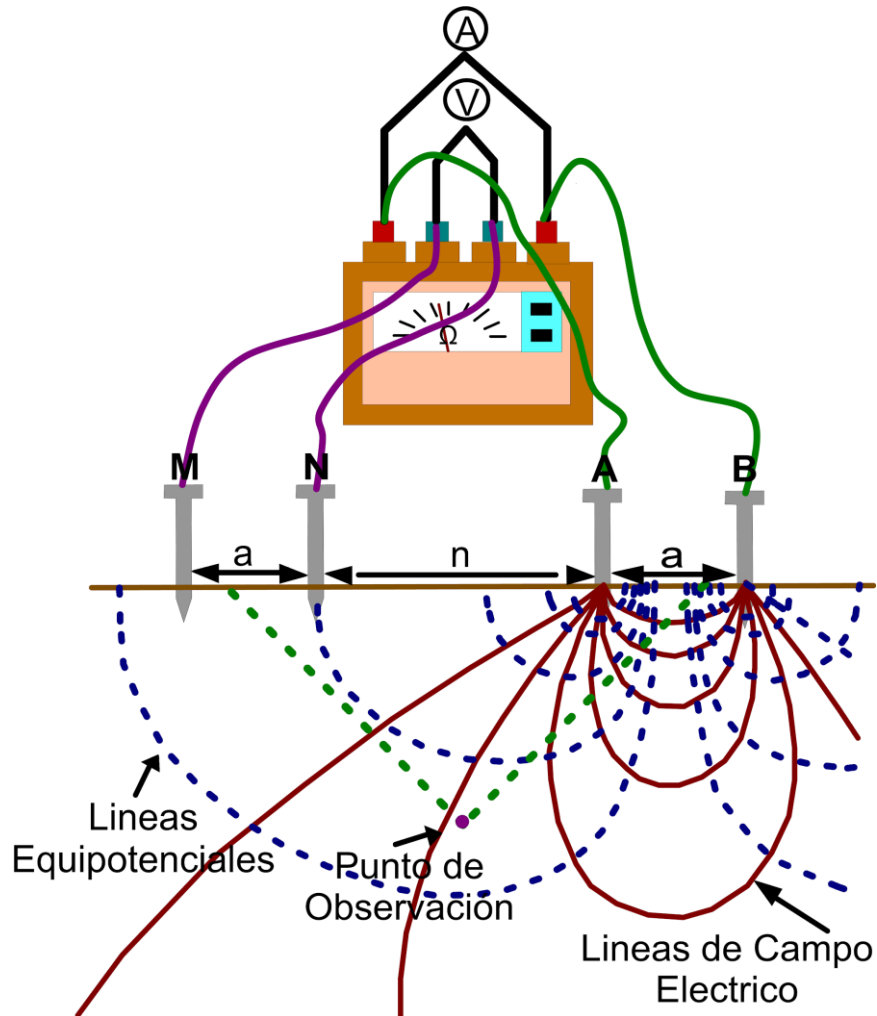


Figura 2.11. Arreglo tipo dipolo - dipolo

En el arreglo **Wenner** se utilizan cuatro electrodos alineados y simétricos con respecto al centro **O**, distribuidos de la siguiente manera: **A, M, N, B**, haciendo que la distancia entre **M - N** sea igual en **A - M** y la misma entre **N - B**, e igual a un valor **a**. La profundidad de estudio se incrementa proporcionalmente conforme se incrementa la distancia mutua **a** entre todos los electrodos (Mussett y Aftab, 2009).

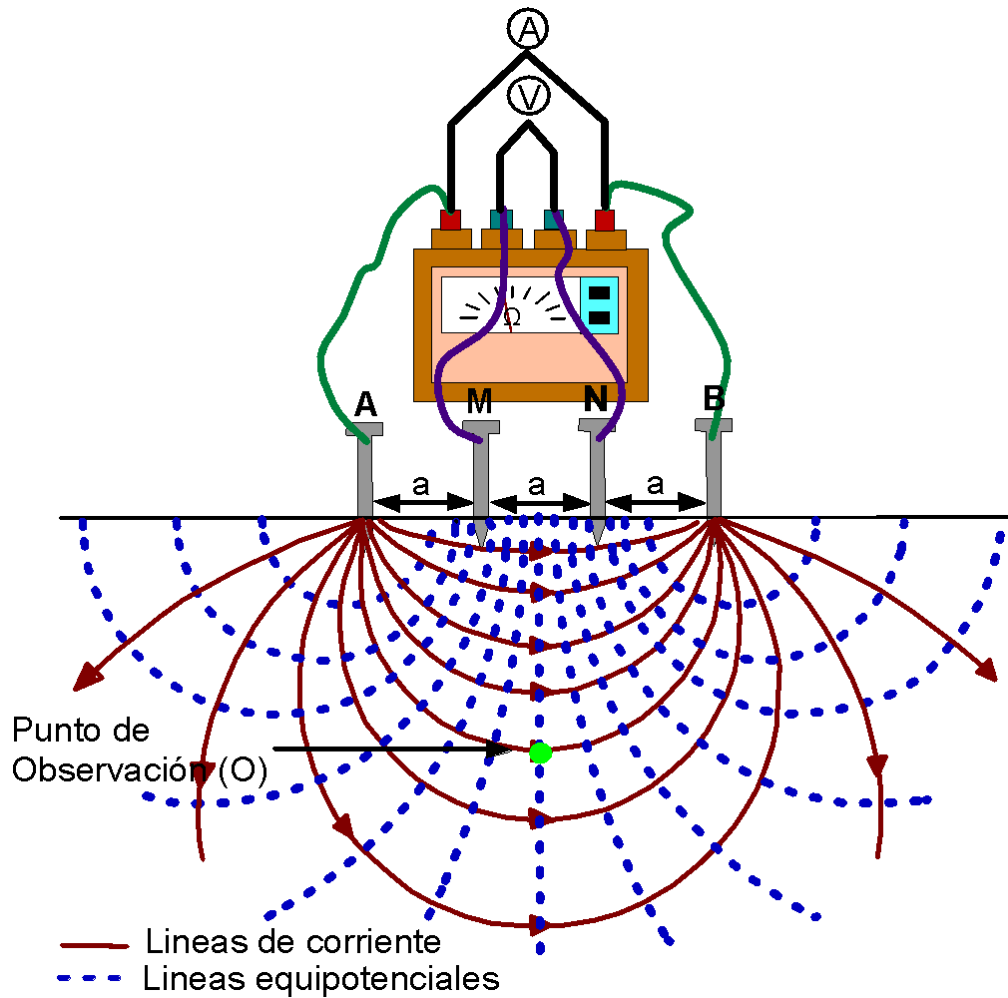


Figura 2.12. Arreglo tipo Wenner.

El arreglo **Schlumberger** es tetra-electrónico simétrico igual que el arreglo Wenner, pero la distancia entre los electrodos de corriente **A y B** es mucho mayor (al menos 5 veces) que entre los electrodos de potencial **M y N**, por lo que manteniendo invariable la separación M-N se aumenta la distancia entre A y B para incrementar la profundidad de estudio (Mussett y Aftab, 2009).

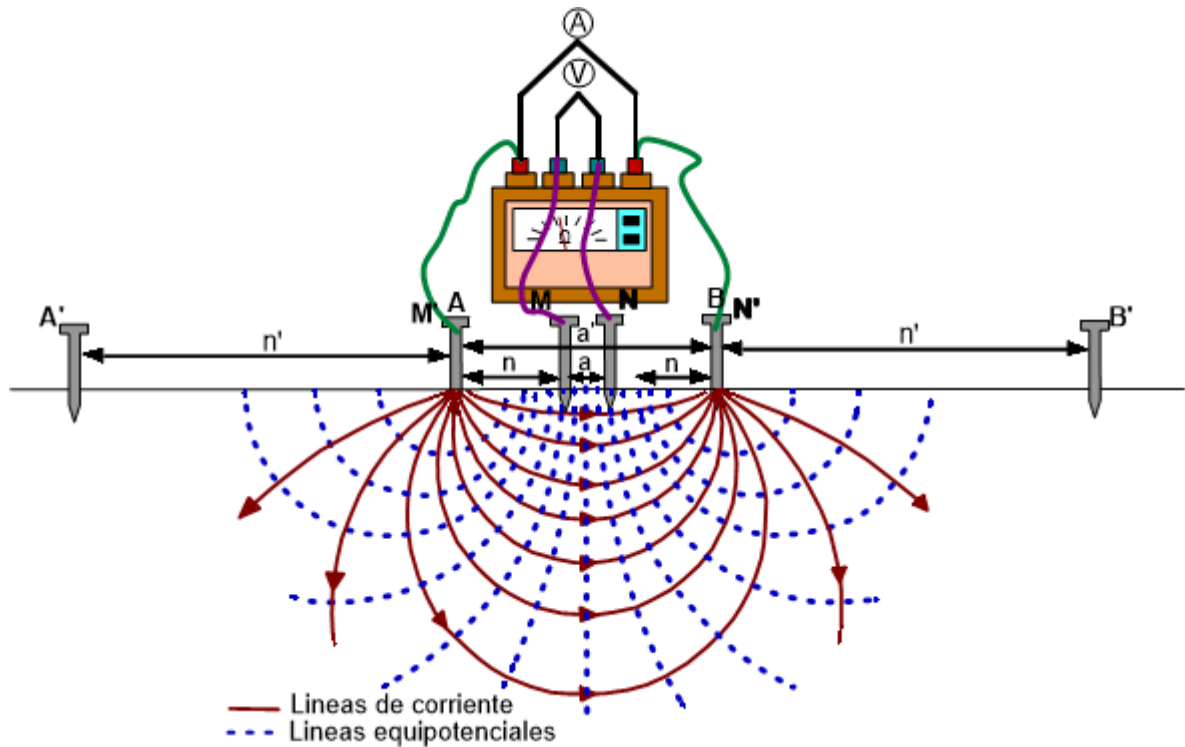


Figura 2.13 Arreglo tipo Schlumberger.

Para fines de esta investigación se utilizó el arreglo Schlumberger para realizar los SEV, dado por su simplicidad de operación y alta productividad.

### 2.2.3.3 TIPOS DE CURVAS de SEV

Si el medio geológico sobre el cual se realiza un SEV es homogéneo, aunque la distancia AB se incremente se tendría el mismo valor de resistividad ( $\rho$ ) real del terreno. Sin embargo, como el medio geológico comúnmente es heterogéneo, lo que se mide en la superficie son valores de resistividad aparente ( $\rho_a$ ), como un valor representativo de la contribución de todo el medio por donde circula corriente eléctrica. En este último caso, resultado del incremento de la distancia AB se tendría un comportamiento variable de  $\rho_a$  llamado curva de campo, curva de  $\rho_a$  o simplemente curva de SEV. Las curvas se clasifican según su número de capas y los valores de resistividad de cada una, en tipos (K, H, Q, A, KH) como se muestran en la figura 2.14. Las curvas de la figura 2.14, son curvas de tres capas y se clasifican con respecto al valor de resistividad de cada una de sus capas, de la siguiente manera:

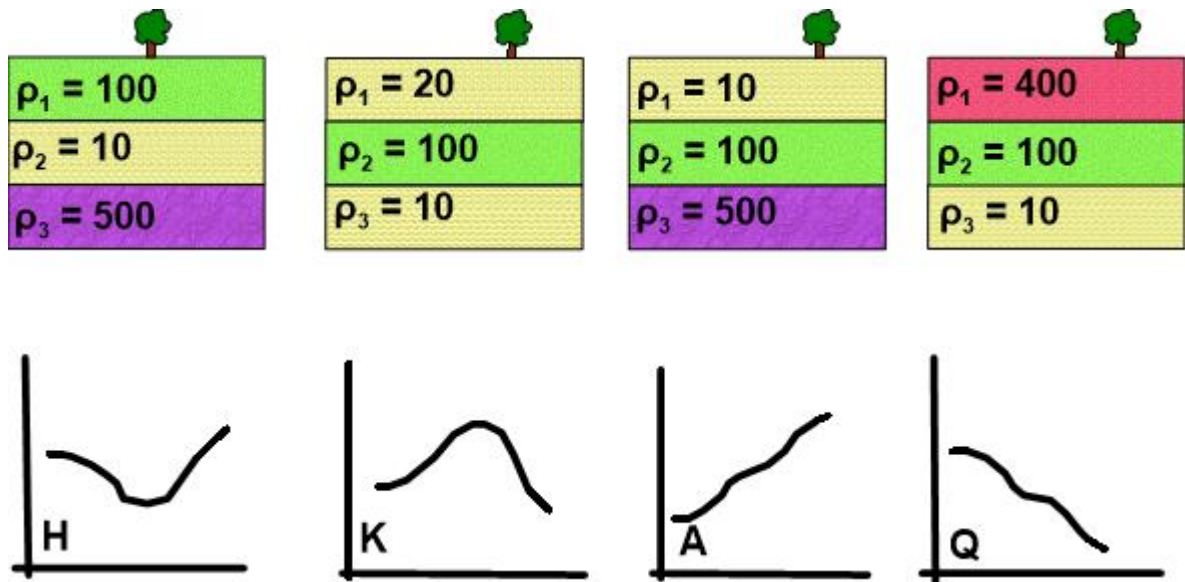


Figura 2.14. Tipo de Curvas

Curva tipo H.- La segunda capa es la de menor resistividad de las tres.  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$

Curva tipo K.- La segunda capa es la que presenta mayor resistividad de las tres.  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$

Curva tipo A.- La resistividad va aumentando con la profundidad.  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

Curva tipo Q.- La resistividad va disminuyendo con la profundidad.  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$  (Fred Pérez; 2011).

Por último, medios con más de tres capas, combinaciones posibles para 4 y 5 capas. Un ejemplo de cómo se clasificaría un área de la zona de estudio con las curvas, sería una zona que fuera de cuatro capas o más, el cual se descompone en intervalos de tres en tres, dándole la nomenclatura correspondiente a cada segmento, como se ve en la figura 2.15, en la que las primeras tres capas forman una curva tipo H, después se toman las capas segunda, tercera y cuarta que dan lugar a una capa tipo K, y por último se toma la tercera, cuarta y quinta capa la cual forma una curva tipo Q, por lo tanto todo el corte completo se clasificaría como un corte de tipo HKQ (Orellana y Money, 1966).

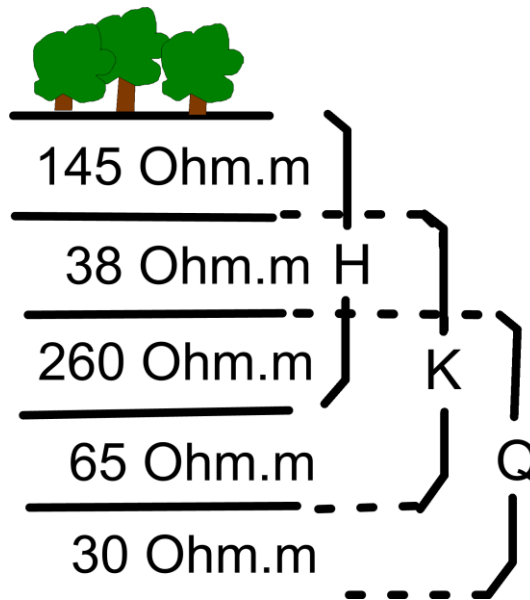


Figura 2.15. Ejemplo de tipo de curva HKQ.

#### 2.2.4. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (TRE).

Este es un método geo-eléctrico que da como resultado una imagen de resistividad 2D. Para realizar una TRE pueden utilizarse diferentes arreglos electrónicos, siendo los más utilizados Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger, este último es llamado así debido a que en la primera medición de resistividad aparente colectada para los electrodos de corriente más próximos a los de potencial se cumple el arreglo Wenner, mientras que para el resto del arreglo se cumple el tipo Schlumberger. Esta técnica puede considerarse como la evolución de los métodos geo-eléctricos clásicos como el SEV y la calicata eléctrica (De la Peña Aponte, 2009).

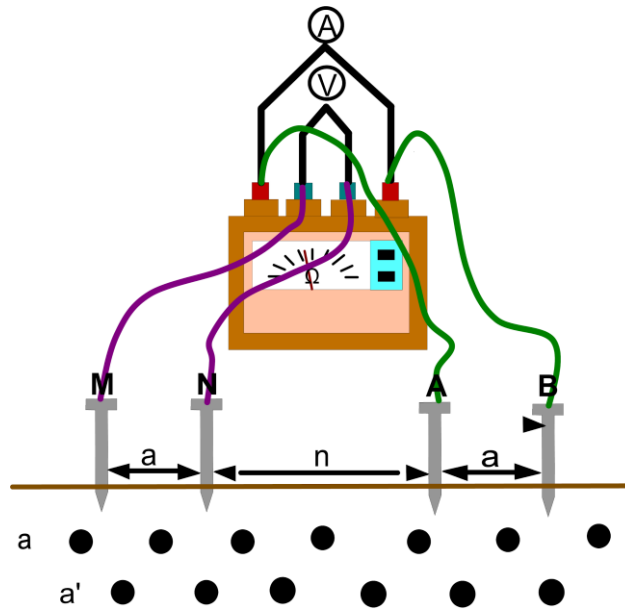
Los estudios eléctricos de imagen en dos dimensiones son ampliamente usados en ingeniería y en estudios ambientales para encontrar estructuras complejas. Estos estudios se realizan usando un gran número de electrodos conectados por un cable a un sistema de medición de resistividad. Los electrodos permanecen fijos en el terreno y con esto es posible obtener un número más elevado de medidas combinadas que en los SEV's (De la Peña Aponte, 2009).

##### 2.2.4.2 DISPOSITIVO ELECTRÓDICOS FUNDAMENTALES:

###### ARREGLO DIPOLO - DIPOLO

La forma más usual de realizar este arreglo es colocando los electrodos de corriente en el 1 y 2 y los de potencial en el 3 y 4, para la segunda medida del nivel 1 se acomodan los

electrodos de corriente en 2 y 3 y los electrodos de potencial en 4 y 5 (Cantos, 1973). Para la primera medida del nivel 2 los electrodos de corriente son 1 y 2, y los de potencial son 4 y 5, así sucesivamente se aumente la distancia entre los electrodos de corriente y de potencial conforme se va avanzando a otro nivel (Cantos, 1973).



### ARREGLO TIPO WENNER-SCHLUMBERGER

El arreglo Wenner-Schlumberger en este los electrodos M y N son situados de manera simétrica al centro y los electrodos de corriente A y B a una distancia mayor que la de M y N. En este arreglo las mediciones del primer nivel se hacen como el arreglo Wenner, y los siguientes niveles se hacen como si fuera un arreglo Schlumberger, la primera medición del nivel 2, los electrodos se colocan en 1, 3, 4, 6, los electrodos 1 y 6 son de corriente y los 3 y 4 son los electrodos de potencial, la separación de los electrodos en los siguientes niveles se muestra en la siguiente figura 2.17 (Cantos, 1973).



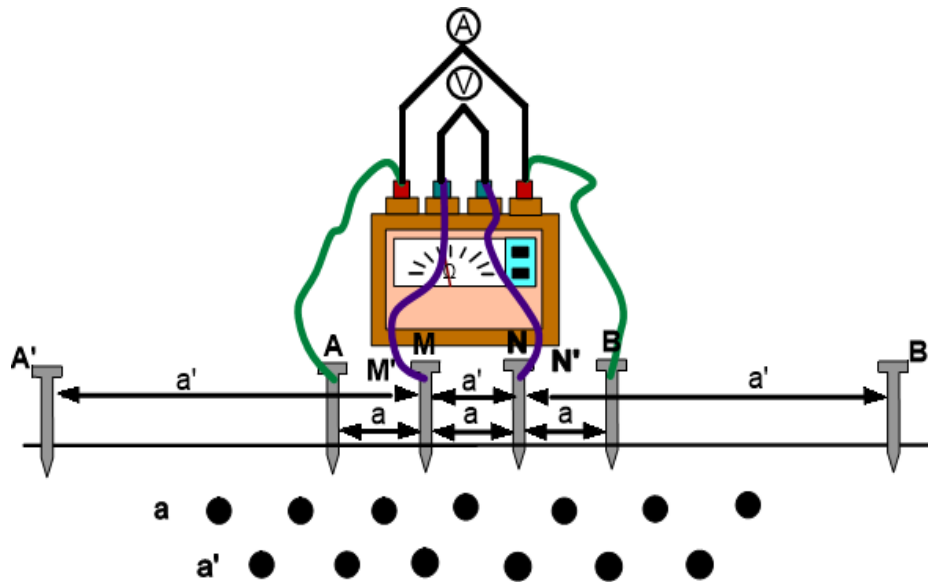


Figura 2.17. Arreglo tipo Schlumberger (Wenner - Schlumberger)

### 2.2.4.3 PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN 2D DE DATOS DE TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

Para realizar la inversión de datos Tomografías Eléctricas Resistivas (TRE) se utilizó el programa RES2DINV 3.5.5 de la compañía Geotomo Software © 1995 - 2006, desarrollado por Locke & Barker. El cual cuenta con varios procesos de inversión de datos y ajustes, nombrándolos a continuación; modelo de discretización del modelo, suavizado de resistividad del modelo, método de inversión combinada, inversión robusta, logaritmo de resistividad aparente, matriz jacobiana, método de optimización y la inversión de mínimos cuadrados la utilizada en este estudio para realizar los modelos de Tomografía Eléctrica Resistiva.

En este estudio de Tomografías Eléctricas Resistivas se utilizó la inversión de mínimos cuadrados, la cual utiliza una restricción de resistividad en la perturbación del modelo y no directamente en los valores de resistividad, produciendo en la mayoría de los casos una leve variación en los valores de resistividad. Esta inversión se realiza mediante la fórmula;

$$(J^T J + uF) d = J^T g - uF r \quad (11)$$

Expresión 11. Donde  $r$  representa un vector conteniendo, el logaritmo de los valores de resistividad modelo, como generalmente este produce un modelo con un error mayor en la resistividad aparente, sin embargo, esta modificación asegura que el modelo final tenga una variación suave en los valores de resistividad.

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE CAMPO**

### **3.1. MÉTODO MAGNETOMETRÍA**

#### **3.1.1. MAGNETOMETRÍA AÉREA**

Los datos de magnetometría aérea se obtuvieron del módulo Seeker del software Oasis Montaje 8.4, de la compañía Geosoft Inc. Copyright © 2015, mismo en el que se procesaron los datos, obteniendo así el Campo Magnético Residual. El método que se siguió para el levantamiento aéreo-magnético se especifica en la carta magnética de campo total proporcionada por el Servicio Geológico Mexicano, en el que, realizaron el vuelo con un avión ISLANDER BN2-A21, utilizando un magnetómetro Geometrics G-822A, con bombeo óptico de vapor de cesio, y el sistema Picodas P-101, una cámara de video Gem System GSM-19 Overhauser, un radar altímetro Sperry RT-220 y un sistema de navegación Ashtech GG24 GPS + GLONAS, 16m. El vuelo se realizó a 300m de altura constante sobre el nivel del terreno, con línea de exploración de rumbo N-S y separación de 1000 m. La distancia entre líneas de control fue de 10 000 m.

#### **3.1.2. MAGNETOMETRÍA TERRESTRE**

En el mes de julio 2017 se realizó el levantamiento magnético terrestre, se realizaron cuatro perfiles de W-E en lecturas continuas, de dos kilómetros cada perfil, con una distancia de separación promedio entre perfiles de 500 m, abarcando un área total aproximada de 4 km<sup>2</sup> (fig. 3.1).

##### **3.1.2.1. EQUIPO UTILIZADO**

Para realizar el levantamiento se utilizaron dos magnetómetros G-856 marca Geometrics, utilizados en las mediciones tomadas en campo. Además, se utilizó la información base proveniente de un magnetómetro de precisión protónico ubicado en el Observatorio Geomagnético de Teoloyucan, Estado de México, esto con fines de procesamiento para realizar la corrección diurna a los datos adquiridos en campo.

## MAPA DE PERFILES DE MAGNETOMETRÍA

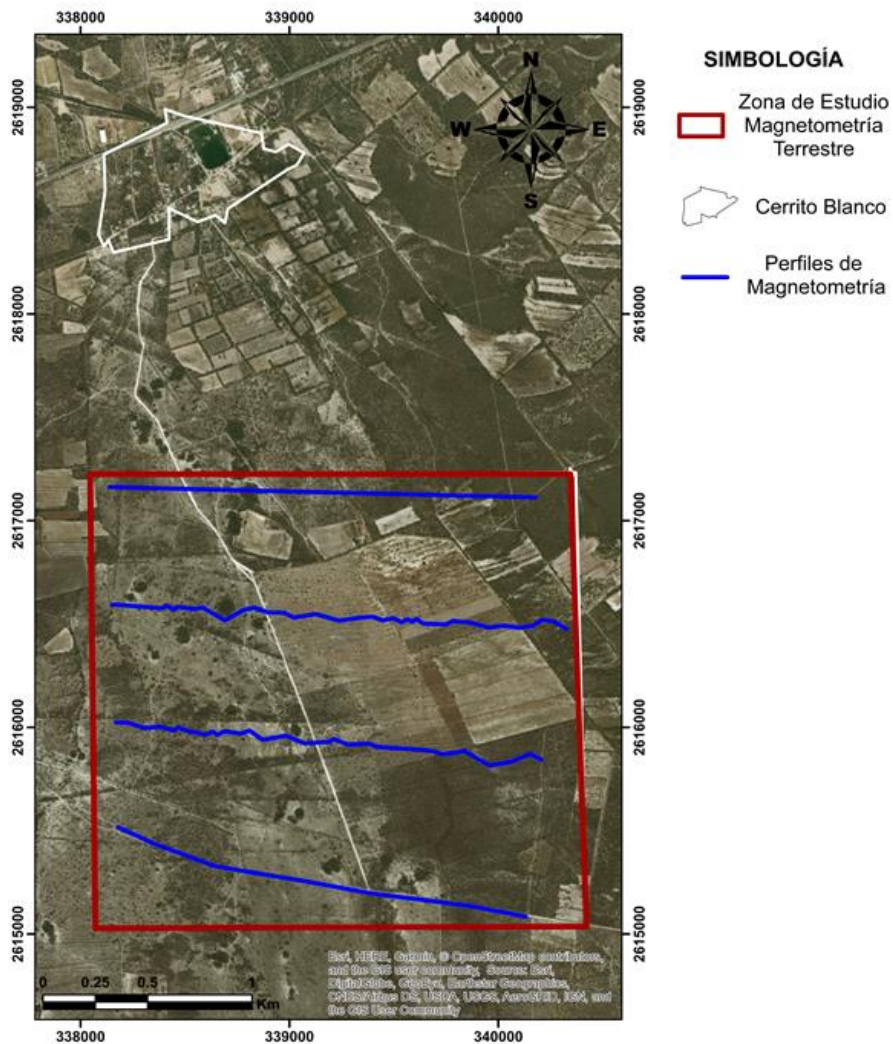


Figura 3.1. Ubicación de perfiles de magnetometría terrestre.

### 3.1.3. PROCESAMIENTO

#### 3.1.3.1. MAGNETOMETRÍA AÉREA

Para procesar los datos se utilizó el software Oasis Montaje 8.4, de la compañía Geosoft Inc. Copyright © 2015. Con ayuda de este software se determina el Campo Magnético Residual, al cual se redujo al polo para la ubicación correcta de los dominios magnéticos. Posteriormente, se determinó la primera derivada y la señal analítica con continuidad ascendente a 500 m con el propósito de resaltarlas las zonas de gradiente magnético y definir con mayor resolución las anomalías magnéticas en el área de estudio.

### **3.1.3.2. MAGNETOMETRÍA TERRESTRE**

Para realizar el procesado de los datos de magnetometría terrestre y construir sus respectivos mapas, se utilizó el software Oasis Montaje 8.4, de la compañía Geosoft Inc. Copyright © 2015. Realizando los siguientes pasos; primero se recalculan todos los datos para obtenerlos como si se hubieran medido con el mismo magnetómetro, con el fin de disminuir el error de calibración. Segundo se realizó la corrección diurna utilizando los datos proporcionados por el Observatorio Geomagnético de Teoloyucan. Tercero a partir de estos datos procesados se calculó el Campo Magnético Residual (CMR). Cuarto del CMR se obtuvo la Reducción al Polo (RP). Concluyendo con la primera derivada vertical con una continuación ascendente de 100 m con el propósito de realizar una mejor interpretación.

## **3.2. MÉTODO ELÉCTRICO**

### **3.2.1 EQUIPO UTILIZADO**

Respecto al levantamiento geo-eléctrico se utilizó el equipo Syscal R2 conectado a un transmisor DC/DC de potencia de 250 W conectado a una batería de 12 V, tanto para realizar las Tomografías Eléctricas Resistivas, como para realizar los Sondeos Eléctricos Verticales.

### **3.2.2 TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA**

Con el propósito de modelar la parte superior del corte, dominada por las formaciones superficiales de yeso, se realizaron cinco perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) como se muestra en la figura 3.3. y en la tabla 3.3. Los perfiles TRE se realizaron con el arreglo electródico Wenner-Schlumberger.

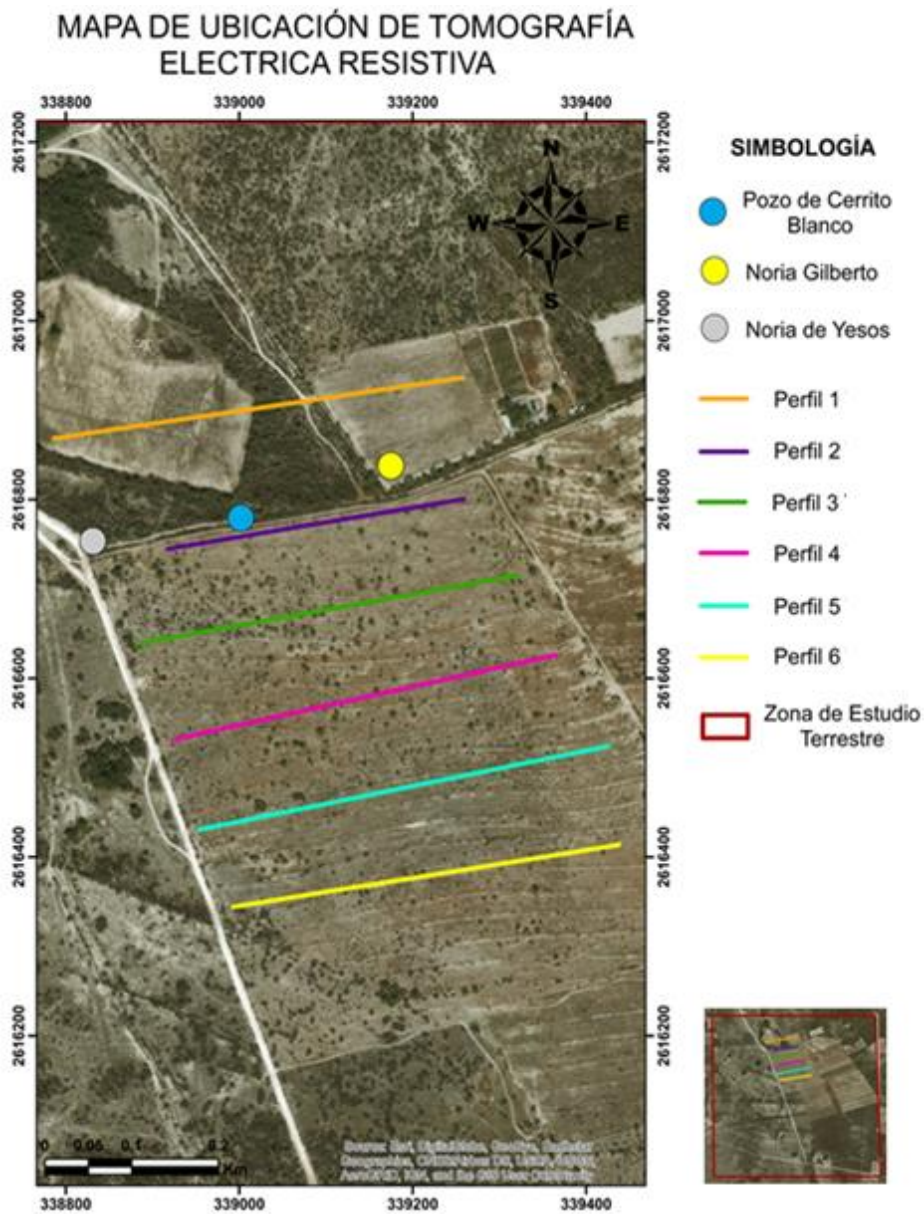


Figura 3.2. Mapa ubicación de perfiles de tomografía de resistividad eléctrica.

### 3.2.2 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Tomando en cuenta los resultados de los estudios magnetométricos y las posibilidades del acceso y de extensión de las líneas de corriente en cada punto, 1 sondeos eléctricos verticales (SEV) fueron realizados en el área de estudio (figura 3.2 y tabla 3.2). Estos SEV's se realizaron utilizando el arreglo electródico Schlumberger, debido a que el primer estrato era de yeso muy resistivo, a este lo sub-yace existe un estrato de gres con un espesor de limos saturado con agua sulfatado el cual se localiza de baja resistividad, por lo que para modelar



su espesor se requiere de aberturas máximas  $AB/2=1000$  m. Se modelo una profundidad de estudio de 350 m, garantizando una buena resolución.



Figura 3.3. Ubicación de Sondeos Eléctricos Verticales.

### 3.2.4. PROCESAMIENTO

#### 3.2.4.1. SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL

Los datos de los Sondeos Eléctricos Verticales se procesaron en el software IX1D de la compañía INTERPEX copyright © 2010 obteniéndose un modelo discreto para cada SEV, apoyándose en la modelación suavizada dada por el algoritmo de Occam, en el análisis de equivalencia y en la información geológica a priori, esto con el propósito de seleccionar el

modelo geoelectrico más adecuado a los datos experimentales. Posteriormente, puntos de SEV fueron correlacionados en perfiles de diferentes direcciones y sus datos experimentales fueron nuevamente interpretados con la ayuda del software IPI2Win del Departamento de Geofísica, Facultad de Geología, Universidad de Moscú, Rusia, partiendo en cada punto del modelo discreto determinado con el software IX1D. Como resultado del procesamiento con IPI2Win, una sección de correlación de modelos geoelectricos 1-D se obtuvo para cada perfil de SEV, las cuales fueron interpretadas en términos geológicos-estratigráficos.

### **3.2.4.2 TOMOGRAFIA ELECTRICA RESISTIVA**

Los datos de Tomografía Eléctrica Resistiva se modelaron en el software RES2DINV 3.5.5 de la compañía Geotomo Software © 1995 - 2006. Usando por el método de mínimos cuadrados para obtener los modelos TRE, y se graficaron en software Surfer 8 de la compañía GOLDEN SOFTWARE © 2010, para una mejor interpretación.

### **3.3 DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA**

Para determinar la conductividad hidráulica, primero se determinó la cantidad de finos sumando la cantidad de arcilla y limos obtenidas mediante el método Bouyoucos. Posteriormente mediante la fórmula reportada por (Delgado-Rodríguez et al., 2011)

$$K = 0.101176 * FINES^{-1.62} \quad \text{Expresión (12)}$$

Expresión (12). Donde K; conductividad hidráulica, finos; suma del contenido de arcilla y limo.

## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA RESISTIVA**

La investigación por medio de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), en el ejido de Cerrito Blanco, ha permitido determinar la profundidad del techo del acuífero y distinguir a detalle los espesores de las formaciones semi-impermeables yesíferas superficiales en las inmediaciones del pozo de Cerrito Blanco (PCB), La Noria de Gilberto (NG) y la Noria de Yesos (NY1), ubicadas al sur del poblado de Cerrito Blanco (figura 3.2).

Los resultados de este estudio se presentan en forma de modelos geo-eléctricos y en mapas de resistividad. Estos últimos permiten mapear mayor resolución las variaciones de

la resistividad del subsuelo para diferentes profundidades de estudio, mostrando la variación lateral de las litofacies que constituyen el acuitardo yesífero y el acuífero regional aluvial, así como poder evaluar la condición del pozo y norias perforados en el sitio.

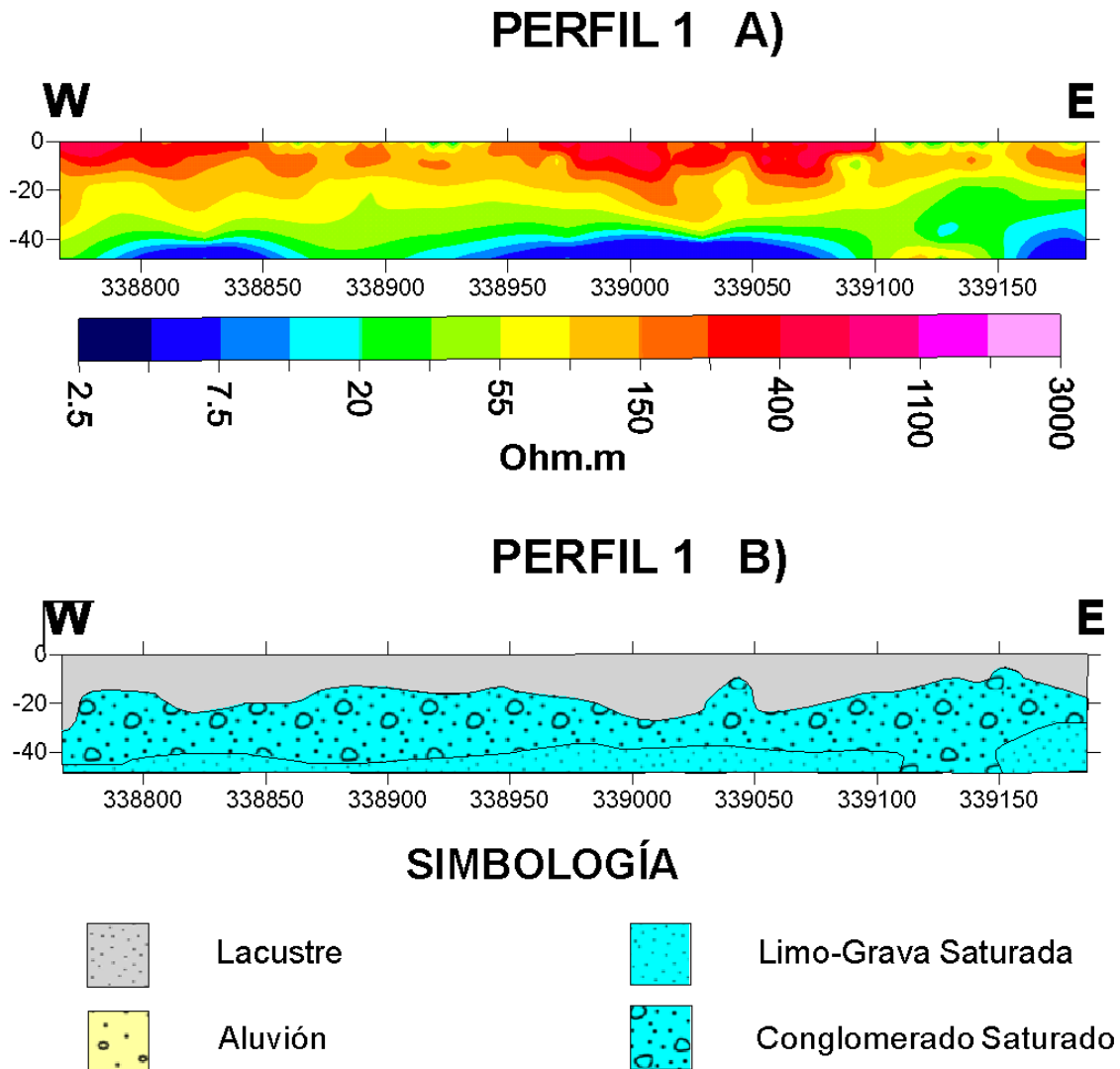


Figura 4.1. Modelo 1 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 1, B) Interpretación geológica del modelo 1.

El modelo 1 de TRE, se ubica aproximadamente a 100 – 120 m al norte del pozo y las dos norias al norte del ejido de Cerrito Blanco, con una longitud total aproximada de 450 m. En este perfil de TRE se identificó claramente la estratigrafía del subsuelo hasta una profundidad de 48 m (figura 4.1 B). El modelo fue interpretado en tres estratos, detectando una capa superficial de lacustre con un rango de resistividad de 90 – 400 Ohm.m y un espesor de 20 – 25 m. Subyaciendo a esta capa se detectó un estrato con resistividad de 20 – 90 Ohm.m con espesor de 20 – 35 m, encontrándose a profundidades de 15 a 48 m,



interpretado como conglomerado polimítico saturado del terciario, interpretación que coincide con Muñoz, (2008) y con lo reportado CONAGUA, (2010a, 2010b), el cual está cubriendo discordantemente a un estrato de limo con lentes del mismo conglomerado con resistividades muy bajas de 5 a 20 Ohm.m, lo cual es explicado por agua con altas concentraciones en  $SO_4^{2-}$ , similar a lo reportado por Muñoz, (2008) en la zona de Cedral-Matehuala y reportado por CONAGUA, (2010a, 2010b), encontrando este estrato a una profundidad mínima de 40 m.

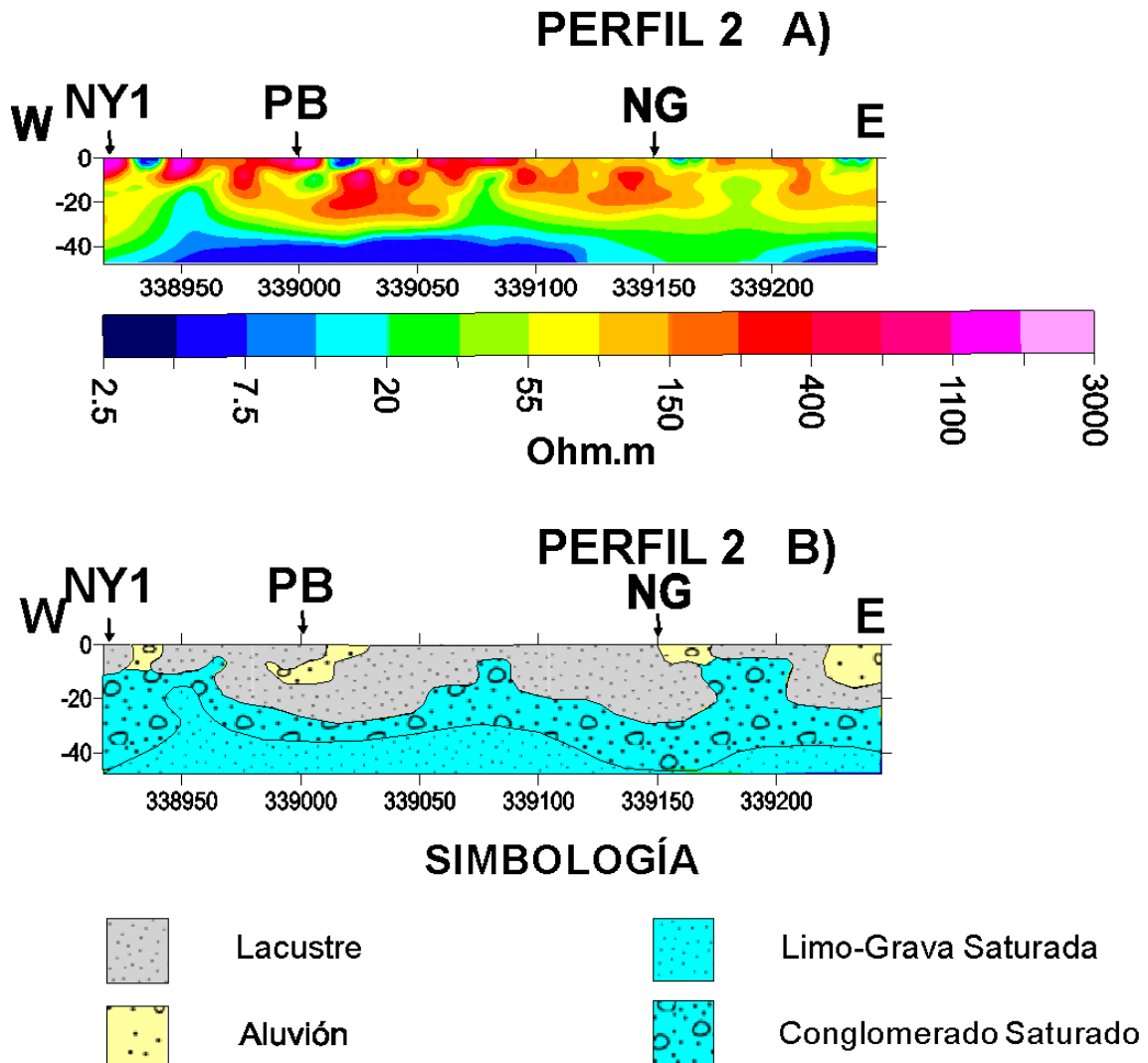
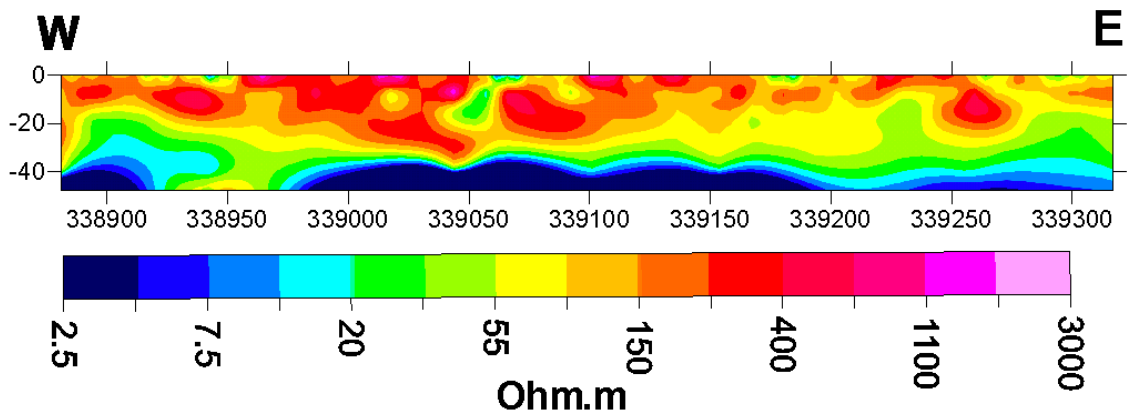


Figura 4.2. Modelo 2 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 2, B) Interpretación geológica del modelo 2.

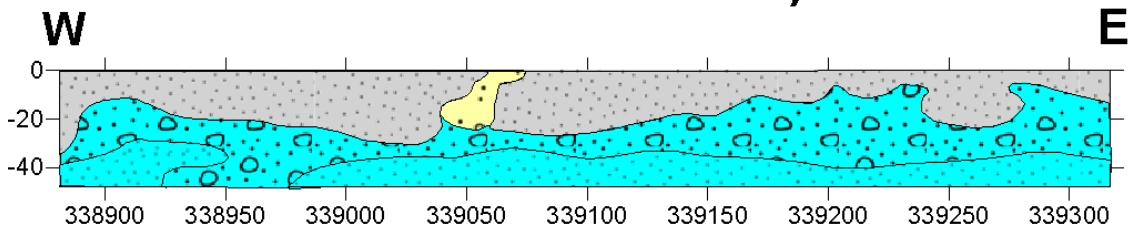
El modelo 2 de TRE se ubica aproximadamente a 15 – 20 m hacia al sur de pozo y norias principales en el ejido de Cerrito Blanco, alcanzando una longitud de 350 m. Al igual que el modelo 1, se interpretaron tres capas geoelectricas (figura 4.2 A), que a su vez

corresponden a tres unidades litológicas en la figura 4.2 B. La primera capa más superficial presenta resistividades de 90 a 400 Ohm.m y espesores de 15 a 30 m, interpretándose como lacustre, y presenta pequeñas secciones con resistividad de 20 a 90 Ohm.m interpretadas como fracturas en el lacustre rellenas de aluvión, coincidiendo con lo reportado por CONAGUA, (2010a, 2010b). Subyaciendo, se encuentra un estrato de conglomerado saturado en espesores de 10 m a 30 m interpretado con resistividades de 20 a 90 Ohm.m, coincidiendo con GEOEX, (2017). A mayor profundidad, un estrato con resistividades de 2.5 a 20 Ohm.m es interpretado como limo con lentes de grava, a profundidades de entre 20 y 30 m, correspondiendo con la información reportada por GEOEX, (2017) y CONAGUA, (2010a, 2010b).

### PERFIL 3 A)



### PERFIL 3 B)



### SIMBOLOGÍA





	Lacustre		Limo-Grava Saturada
	Aluvión		Conglomerado Saturado

Figura 4.3. Modelo 3 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 3, B) Interpretación geológica del modelo 3.

En el modelo 3 de TRE, se ubica al sur del pozo de Cerrito Blanco. En este perfil se interpretaron tres capas geo-eléctricas principales, interpretadas geológicamente en la figura 4.3 B, la primera capa que se encuentra en la superficie se interpretó como lacustre por sus resistividades de 90 a 400 Ohm.m con espesores de 15 a 40 m, con una fractura rellena de aluvión interpretada así, por observar una línea transversal con resistividades de 20 a 150 Ohm.m en el estrato lacustre. Subyaciendo se encuentra la segunda capa de resistividades de 20 a 100 Ohm.m encontrada a profundidades de 15 a 30 m con espesores de 30 m interpretada como conglomerado saturado. La tercera capa modelada con resistividades de 2.5 a 20 Ohm.m, encontrada a profundidades de 35 a 40 m interpretada como limo saturado.

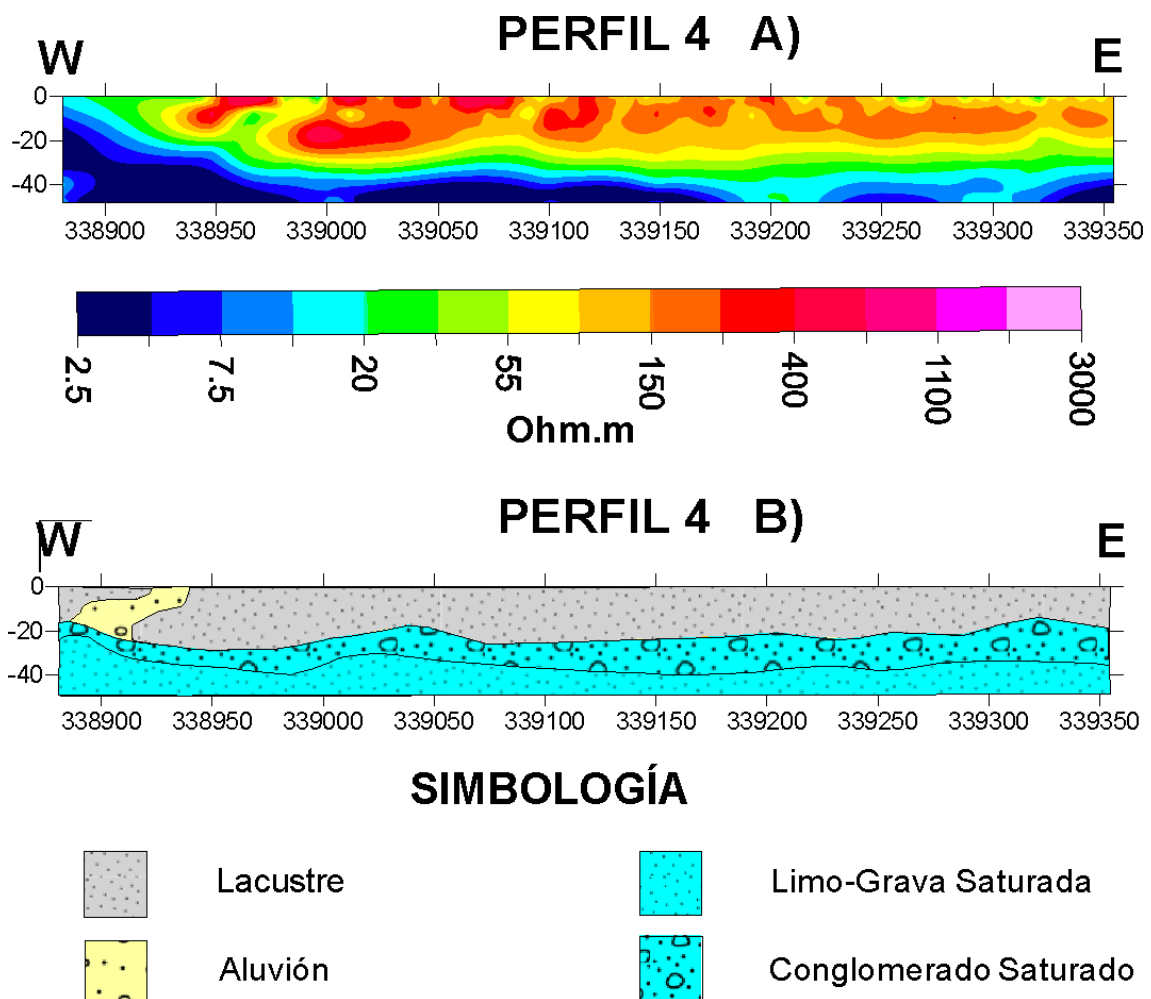


Figura 4.4. Modelo 4 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 4, B) Interpretación geológica del modelo 4.

El modelo geoelectrico de TRE 4, se ubica al sur del pozo y norias principales del área de estudio con una longitud de 450 m. En la figura 4.4 A se observan tres capas geo-eléctricas interpretadas en la figura 4.4 A como tres capas litológicas. El primer estrato interpretado como lacustre tiene resistividades de 90 a 400 Ohm.m, con espesores de 20 a 35 m, subyaciendo una capa de conglomerado saturado de resistividades de 20 a 90 Ohm.m que se encuentra a profundidades de 15 a 25 m con espesores de 10 a 20 m, subyaciendo a este conglomerado se encuentra la tercera capa de material limoso saturado con agua sulfatada con resistividades de 5 a 20 Ohm.m a profundidades de 25 a 35 m de acuerdo a lo reportado por CONAGUA, (2010a, 2010b).

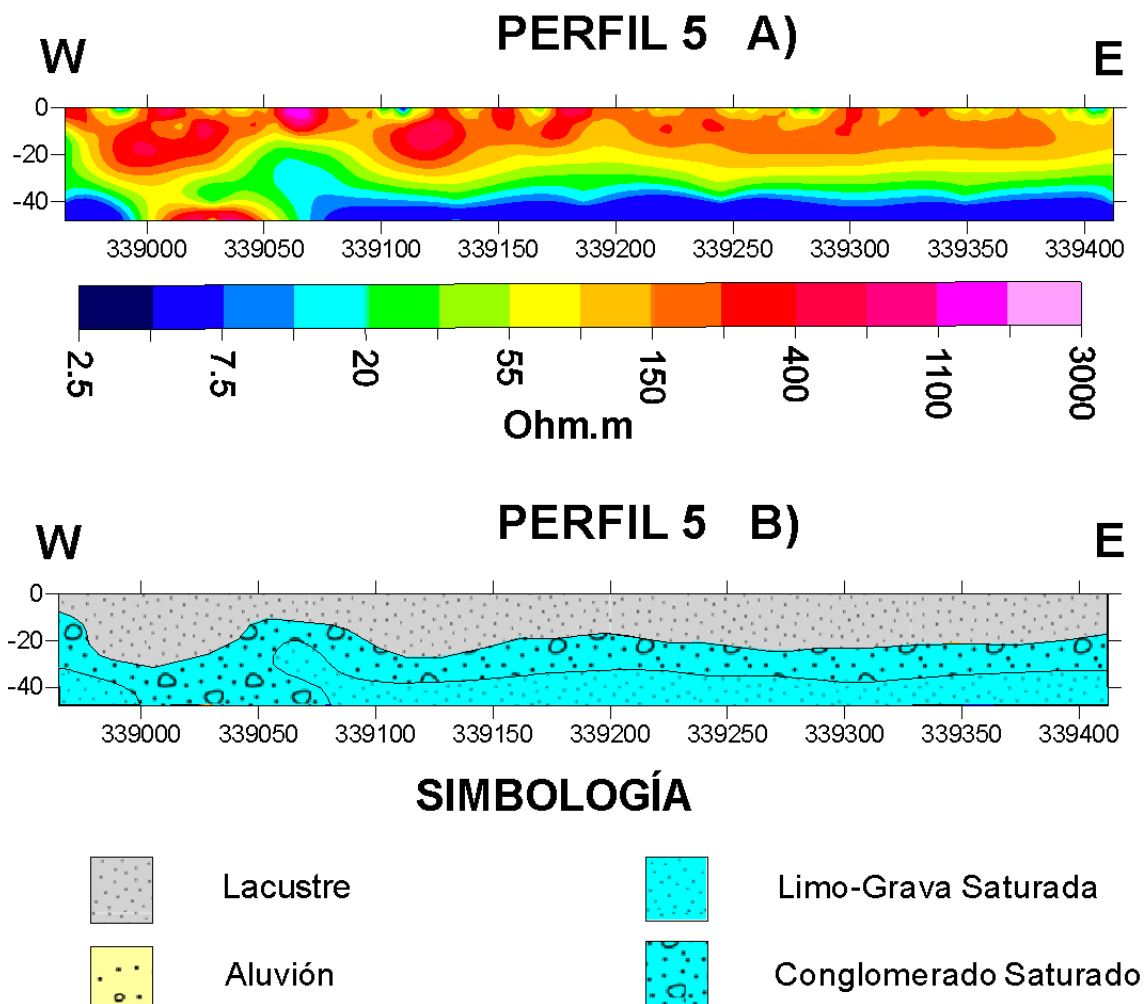


Figura 4.5. Modelo 5 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 5, B) Interpretación geológica del modelo 5.

El modelo 5 de TRE, observado en la figura 4.5 su sección geo eléctrica en la figura 4.5 A) y su interpretación geológica en la figura 4.5 B) en la parte superior se observa un estrato

de yesos con espesores de 15 a 30 m y resistividades de 90 a 400 Ohm.m. Subyaciendo, se encuentra una segunda capa con resistividades de 20 a 90 Ohm.m interpretada como conglomerado saturado con espesor entre 15 a 30 m. Una tercera capa observada en profundidades de 30 a 40 m es interpretada como limo saturado.

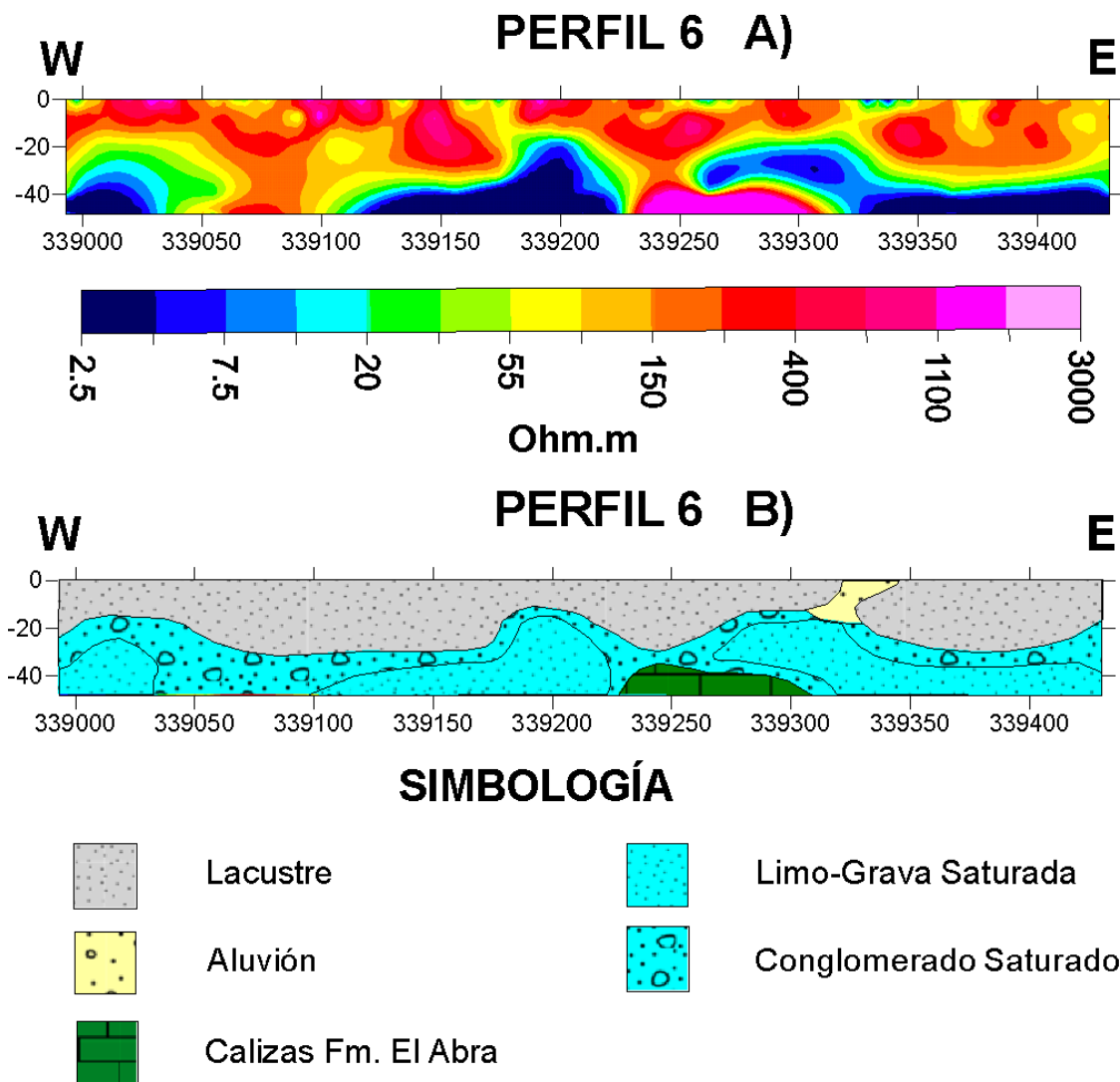


Figura 4.6. Modelo 6 de Tomografía de Resistividad Eléctrica. A) Modelo geo-eléctrico 6, B) Interpretación geológica del modelo 6.

En la figura 4.6 observamos el modelo 6 TRE, en el inciso A) se observa el modelo geo-eléctrico y en el inciso B) se observa la interpretación geológica del correspondiente modelo. Se interpretaron cuatro capas, en la superficie se observa un estrato lacustre con espesores de 20 a 40 m y resistividades de 90 a 400 Ohm.m, se interpreta que existen secciones de yesos de gran pureza que sobrepasa la resistividad de 400 Ohm.m. Subyace un estrato de conglomerado saturado con resistividades entre 20 y 90 Ohm.m, en estratos

de 15 a 25 m de espesor. Se encuentra una tercera capa de material limoso saturado que presenta resistividades de 2.5 a 20 Ohm.m, encontrada a profundidades entre 25 y 40 m. En el centro del modelo se observa un afloramiento de calizas muy compactas interpretada de esta manera por resistividades por arriba de 1000 Ohm.m.

## MAPAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La modelación de mapas a partir de datos de TRE permitió identificar los estratos geológicos en los que se encuentran el pozo de Cerrito Blanco y las norias del ejido, es decir, cambios horizontales de lito-estratigrafía para las profundidades: 0 m, 2.5 m, 7.5 m, 18.5 m, 25 m, 32 m y 48 m.

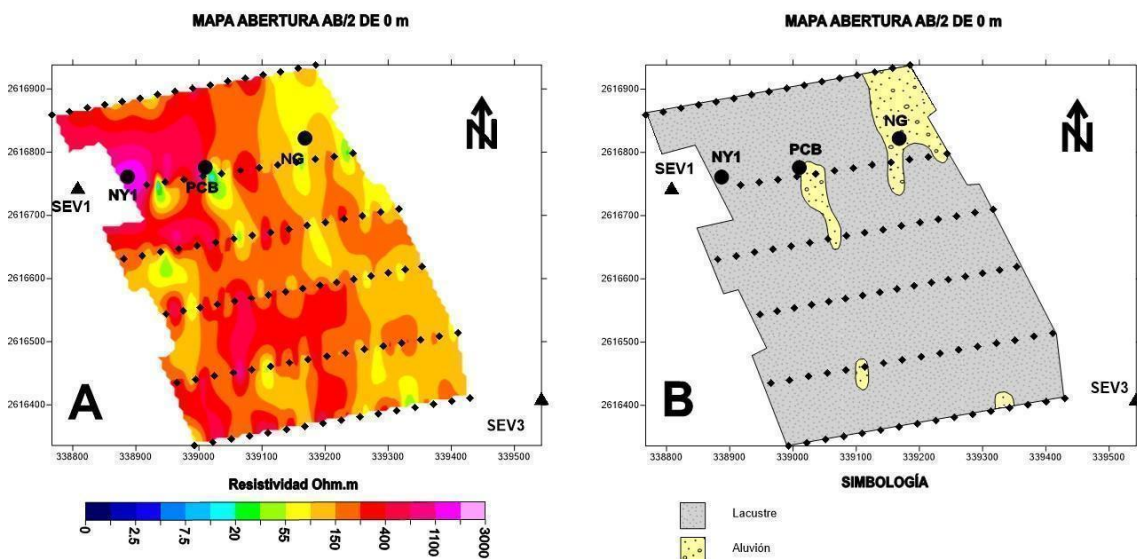


Figura 4.8. Mapa obtenido a partir de los modelos de Tomografía de Resistividad Eléctrica, profundidad estimada 0 m. A) Mapa geo-eléctrico, B) Mapa de interpretación geológica.

En los modelos de resistividades por capa (o profundidad) obtenidos mediante la aplicación del método TRE, se observa el predominio del yeso desde la superficie hasta los 18.5 m de profundidad (figuras 4.8 B a 4.11 B) dado por el rango de resistividad 90 – 400 Ohm.m (figuras 4.8 A a 4.11 A) Algunos lentes de aluvión pueden también presentarse en la zona más superficial (figura 4.8 B) identificados por sus rangos de resistividad entre 20 – 90 Ohm.m (figura 4.8 A) similar a lo reportado por (CONAGUA, 2010a; 2010b; GEOEX, 2017). Alrededor de la noria NY1, ubicada a NW de la zona de estudio, un lente de yeso manifestado por valores de resistividad mayores a 400 Ohm.m, explica la ausencia de agua en dicha noria, la que, con 10 m de profundidad, se encuentra totalmente excavada en este

material semi-impermeable. El pozo PCB del ejido de Cerrito Blanco se encuentra en una zona de fractura del estrato superficial de yesos que profundiza hasta los 7.5 m, sin embargo, a profundidades mayores el yeso recupera su integridad y se extiende al menos hasta los 25 m de profundidad; si tomamos en cuenta que el pozo PCB tiene una profundidad máxima de 50 m, podemos entender la situación actual de este pozo: es la única fuente de agua subterránea de la zona de estudio y, además, su pronto abatimiento una vez que se extrae agua del mismo. En la noria de Gilberto (NG), excavada mayormente en material aluvión, su máxima profundidad de 23 m solo garantiza que sus últimos 5 m alcance el estrato de yeso saturado, siendo esto evidenciado en su pobre tirante de agua y su rápido abatimiento.

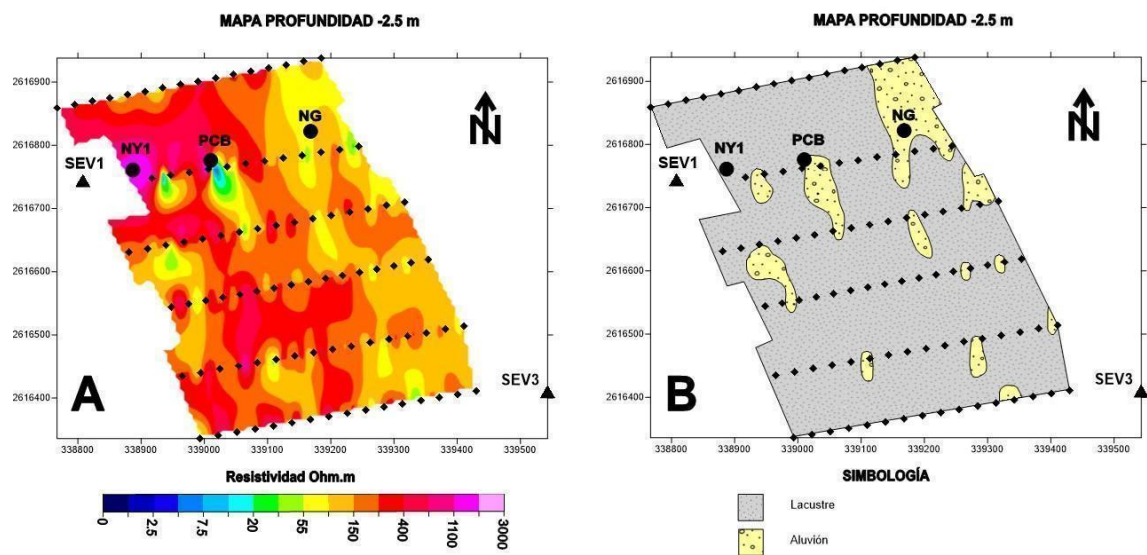


Figura 4.9. Mapa TRE, profundidad estimada 2.5. A) Mapa geoelectrico, B) Mapa de interpretación geológica.

A continuación, se describen algunas características particulares de los mapas de resistividad interpretada para diferentes profundidades.

En los mapas de resistividades interpretadas para las profundidades 0 m (figura 4.8 y 4.9) se observan altas resistividades de 90 – 1000 Ohm.m, como reflejo del predominio del yeso no intemperizado, desde saturado hasta seco, respectivamente. Para 2.5 m de profundidad (figura 4.9) existe mayor cantidad de lentes de aluvión que en la superficie (figura 4.8).



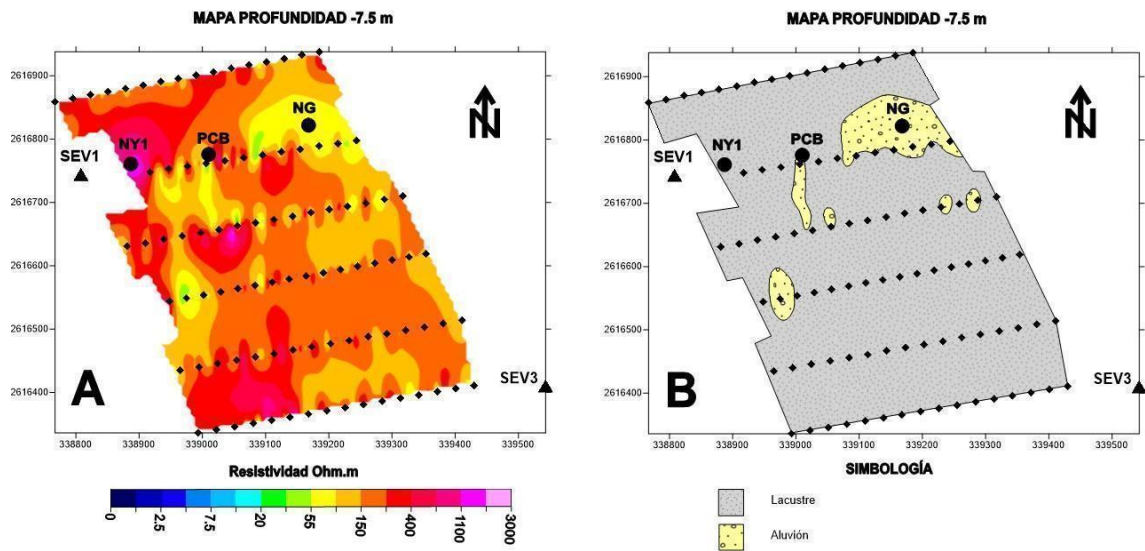


Figura 4.10. Mapa TRE, profundidad estimada 7.5 m. A) Mapa geoelectrico, B) Mapa de interpretación geológica.

En el mapa de resistividades interpretadas para la profundidad 7.5 m (figura 4.10), se observa que predominan las resistividades de 90 a 400 Ohm.m y unas pequeñas anomalías de 20 – 90 Ohm.m figura 4.10 (A), interpretado como estrato de yesos con algunas fracturas rellenas de aluvión figura 4.10 (B), por lo que a esta profundidad aún predomina la presencia de yesos.

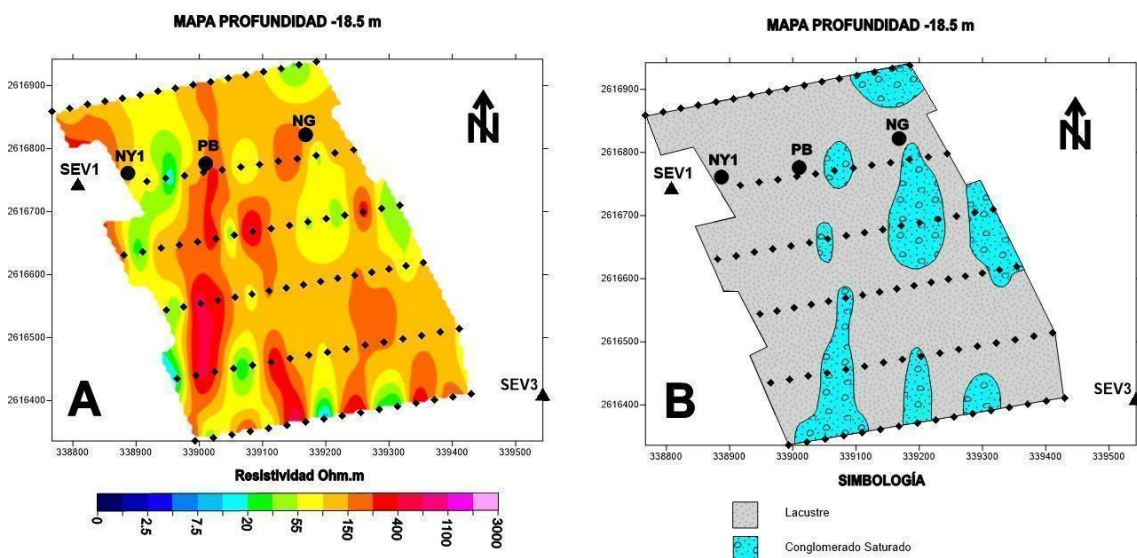




Figura 4.11. Mapa TRE, profundidad estimada 18.5 m. A) Mapa geo-eléctrico, B) Mapa de interpretación geológica.

En el mapa de resistividades interpretadas para la profundidad 18.5 m (figura 4.11), aún predomina las altas anomalías 90 - 400 Ohm.m (figura 4.11 A) interpretadas ahora como yesos saturados figura 4.11 (B). Se encuentran pequeñas anomalías de resistividades de 20 a 90 Ohm.m asociadas con conglomerado saturado (figura 4.11 B) coincidiendo con los rangos de resistividad que reporta Muñoz Quintana (2008).

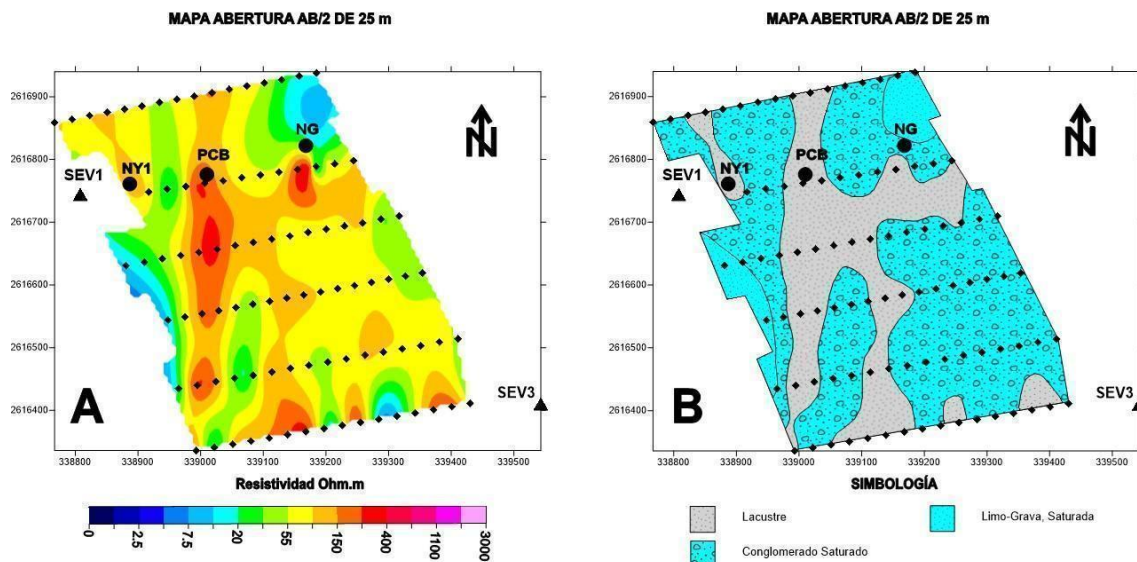


Figura 4.12. Mapa obtenido a partir de los modelos de Tomografía de Resistividad Eléctrica, profundidad estimada 25 m. A) Mapa geo-eléctrico, B) Mapa de interpretación geológica.

En el mapa de resistividades interpretadas para la profundidad de 25 m (figura 4.12), el pozo PCB se localiza en una alta anomalía de 100 a 400 Ohm.m, interpretada como yeso, lo que probablemente afecta la producción del pozo y por lo que el pozo abate en unas cuantas horas.

A la profundidad modelada de 31.8 m (figura 4.13), predomina un rango de resistividad de 20 – 90 Ohm.m figura 4.13 (A), por lo que se interpretan como conglomerado saturado en la figura 4.13 (B) en correspondencia con lo reportado en GEOEX, (2017). En el mapa de la figura 4.13 (A) se observa una anomalía al NW del área, de alta resistividad de 90 a 400 Ohm.m, interpretada como yeso en la figura 4.13 (B) por lo que se deduce que a estas profundidades aún encontramos el estrato de yesos en la zona de noria de yesos (NY1), conformando que el área seleccionada para la noria NY1 es inadecuada para este tipo de pozo, aun si se hubiera excavado a mayor profundidad. A su vez se observa pequeñas

anomalías de baja resistividad de 5 a 20 Ohm.m, interpretadas como limo saturada de agua sulfatada. Debido a que el pozo PCB fue perforado a 50 m, el estrato de conglomerado le ayuda en su producción de agua por alta permeabilidad.

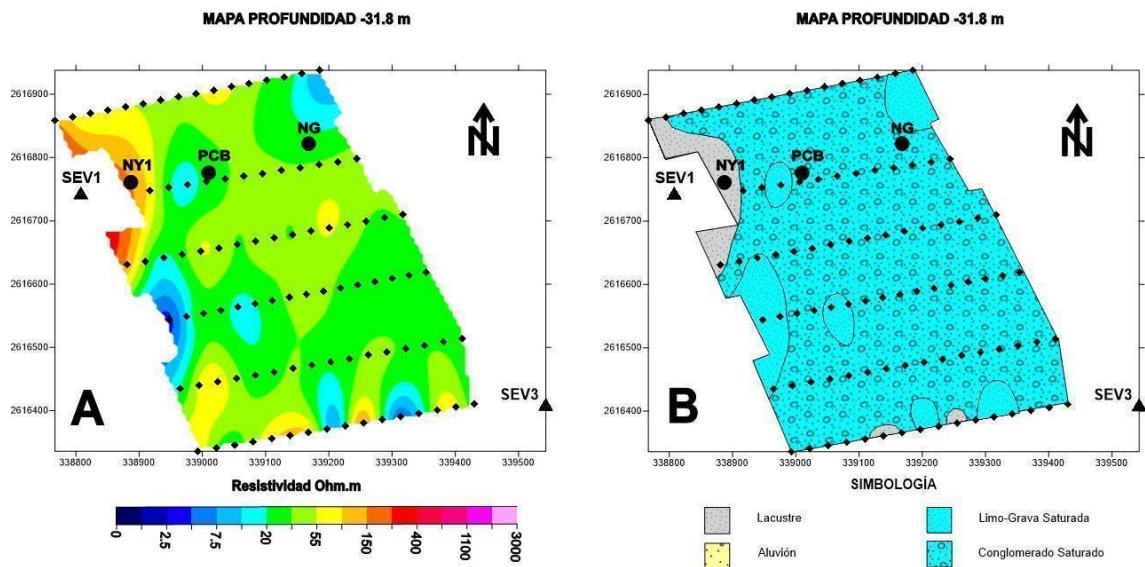


Figura 4.13. Mapa TRE, profundidad estimada 32 m. A) Mapa geoelectrico, B) Mapa de interpretación geológica.

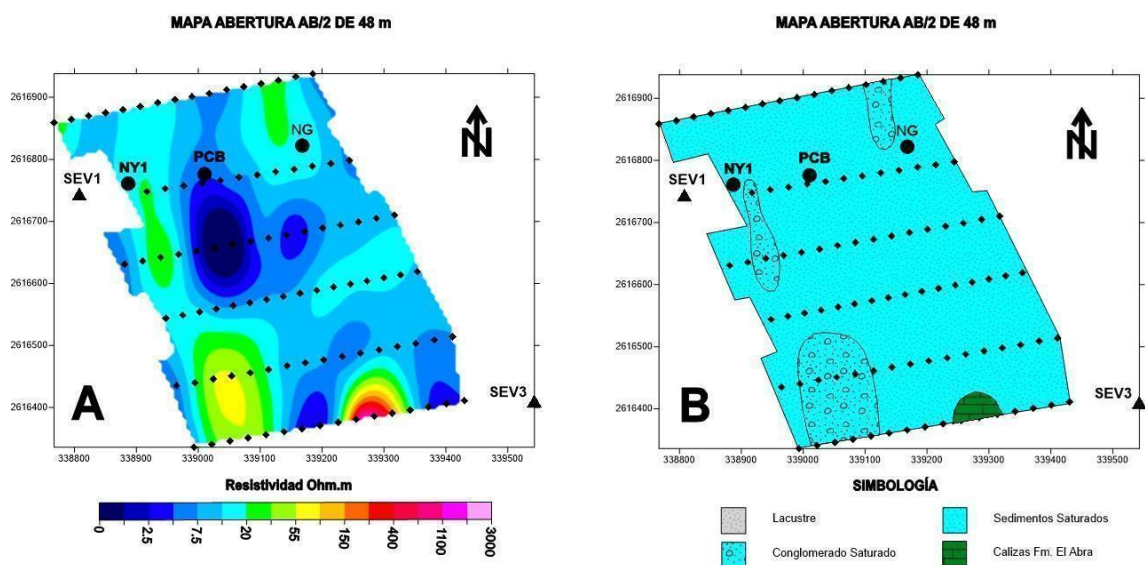


Figura 4.14. Mapa obtenido a partir de los modelos de Tomografía de Resistividad Eléctrica, profundidad estimada 48 m. A) Mapa geoelectrico, B) Mapa de interpretación geológica.

En la modelación del mapa de profundidad de 48 m se observa que predominan las resistividades de 5 a 20 Ohm.m (figura 4.14 A), debido a la presencia del estrato de limo con lentes de conglomerado y altas concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  (figura 4.14 B). El pozo PCB se ubica en limo saturado de agua, lo que explica su bajo rendimiento. Pequeñas anomalías de resistividades 20 a 90 Ohm.m (figura 4.14 A) corresponden con conglomerado saturado (figura 4.14 B), mientras que una anomalía de altas resistividades (150 a 1800 Ohm.m) al sur del mapa es interpretada como caliza de la Fm. El abra.

## **4.2 DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA**

De acuerdo al contenido de finos en sedimentos de 46% se calculó su permeabilidad correspondiente es de 0.51 (m/día) y para la matriz de conglomerado de 33% se le calculó una permeabilidad de 0.70 (m/día), haciendo evidente la diferencia en permeabilidad entre ambas formaciones. Esto pudiera indicar que la presencia de espesores considerables de conglomerados en el subsuelo saturado indica una mayor factibilidad para la perforación de pozos de alto rendimiento.

### 4.3 MAGNETOMETRÍA

#### 4.3.1 AERO- MAGNETOMETRÍA

#### DOMINIOS MAGNÉTICOS

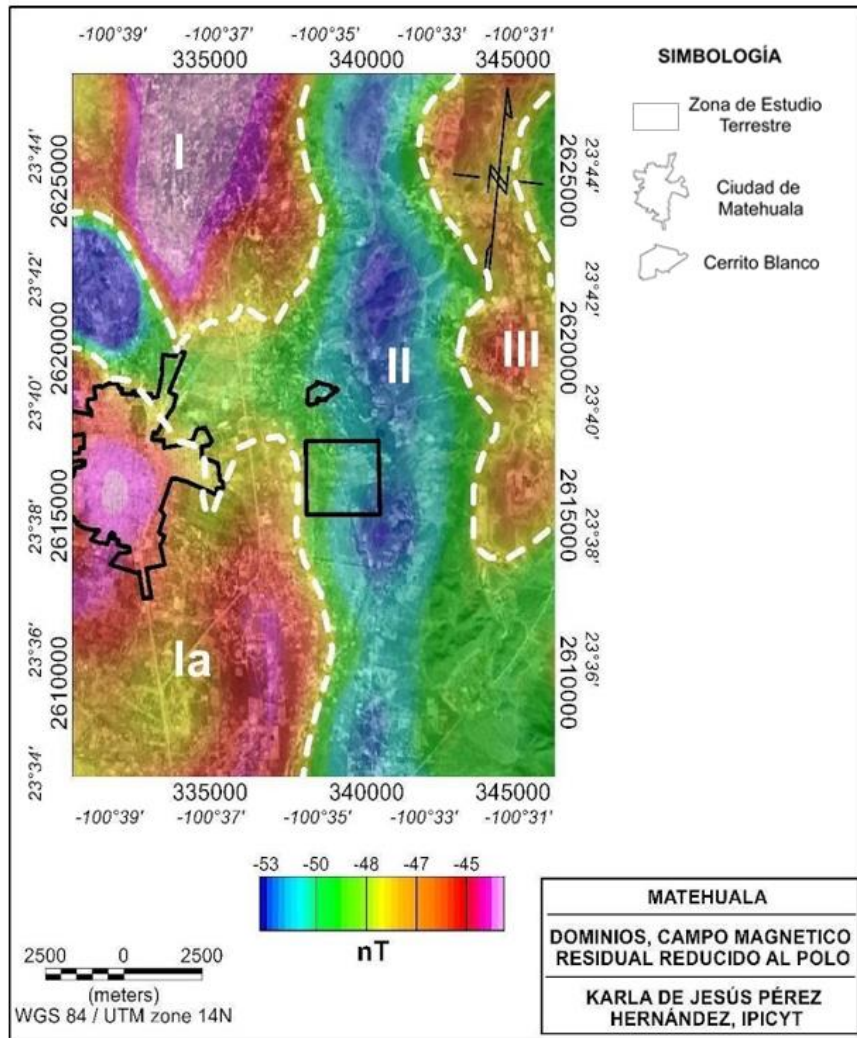


Figura 4.19 Dominios magnéticos en el área regional.

Los dominios magnéticos que se observan en la magnetometría área, mostrados en la figura 4.19 tienen una orientación preferencial N - S, observando que la ciudad de Matehuala cae mayormente en el dominio *Ia* un alto magnético de una señal de -47 a -43 nT interpretado al Dominio *I* y *Ia*, como dos ramificaciones de una roca intrusiva granodiorita-monzonita que aflora en la Sierra Real de Catorce. Nuestra área de estudio terrestre cae en el dominio II bajo magnético de -49 a -53, interpretado como calizas de la formación El Abra. El dominio III se observa con una señal magnética de -48 a -45 se



interpreta como basalto que subyace a las calizas de la Fm. El Abra, reportado en la carta 1:250, 000.

### LINEAMIENTOS MAGNÉTICOS

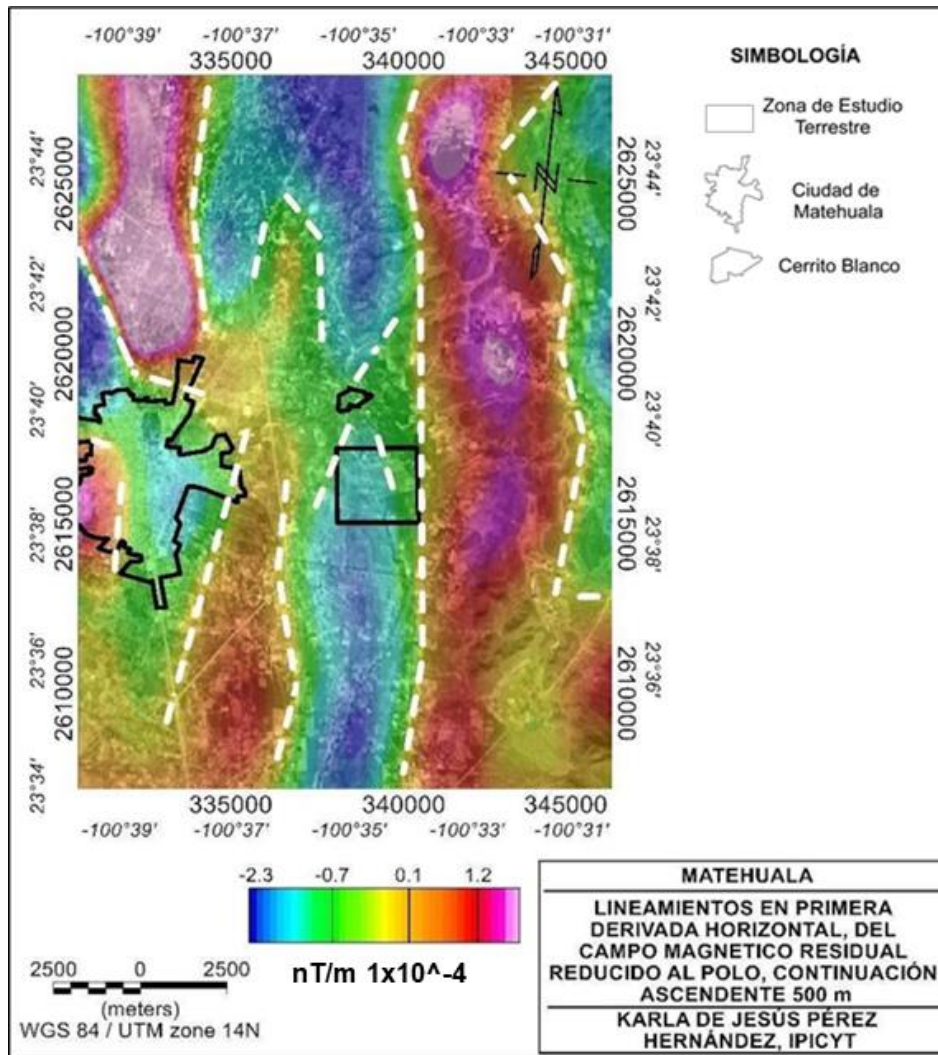


Figura 4.20 Lineamientos magnéticos en el área regional.

Se observa en la figura 4.20, los lineamientos magnéticos en magnetometría área, que tienen una orientación preferencial N-S, observando algunos gradientes con orientación NW–SE en el área de la ciudad de Matehuala . Dentro del área de estudio terrestre se encuentra un lineamiento con orientación NE-SW, y otro en el extremo NE del área con dirección NW-SE. Estos gradientes pueden ser interpretados como fallas subterráneas que representan zonas favorables para la infiltración de agua.

### 4.3.2 MAGNETOMETRÍA TERRESTRE

#### DOMINIOS MAGNÉTICOS

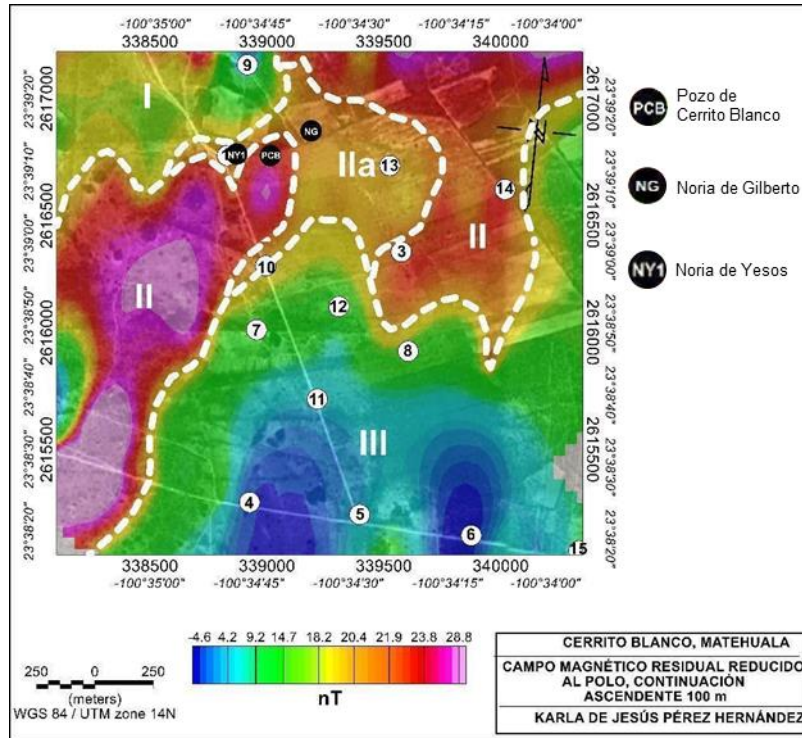


Figura 4.21 Dominios magnéticos en el área local.

Los dominios magnéticos en el área local, tienen una orientación preferencial NE-SW. Los dominios I y III con señal magnética de -5 a 20 nT se interpretan como calizas de la Formación el Abra por su baja señal magnética y el dominio II con una señal magnética de 20 nT a 28 nT, la que se interpreta como una ramificación de un intrusivo de granodiorita – monzonita que aflora al oeste en la Sierra Real de Catorce y al sur en el Milagro de Guadalupe que en nuestra zona no afloró.

## LINEAMIENTOS MAGNÉTICOS

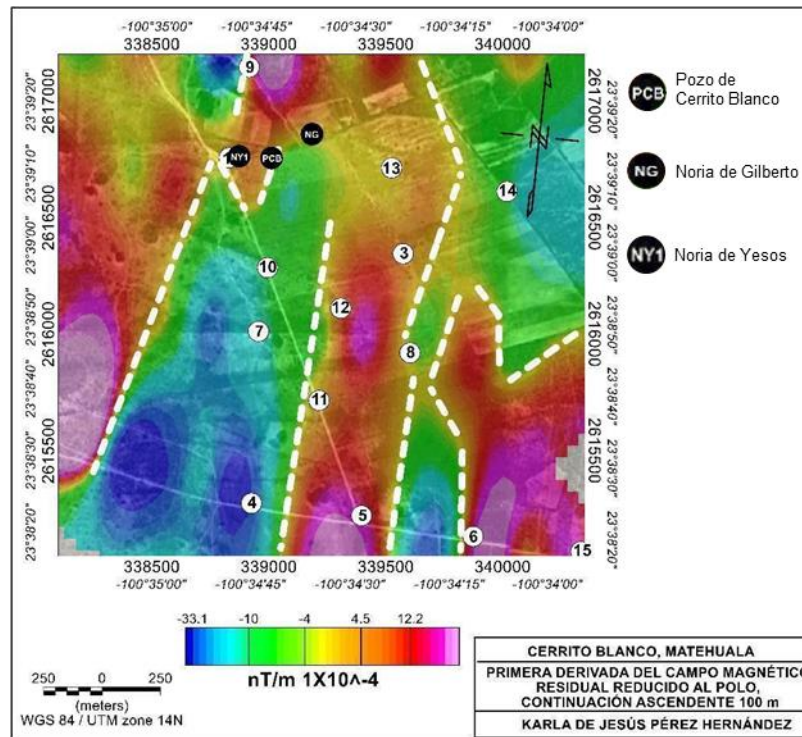


Figura 4.22 Lineamientos magnéticos en el área local.

Se observa que los lineamientos magnéticos en el área de estudio tienen una orientación preferencias N-S y coinciden con los obtenidos a partir de la magnetometría aérea. Observando que los gradientes son altamente marcados cambiando drásticamente de anomalías de señal magnética de  $13 \times 10^{-3}$  a  $23 \times 10^{-3}$  nT/m hacia anomalías de señal magnética de  $-14.5 \times 10^{-3}$  a  $33 \times 10^{-3}$  nT/m. Se observa que la noria NY1 cae cerca de un gradiente horizontal, así como cerca del pozo PCB cae un gradiente magnético con orientación N-S, la Noria de Gilberto cae justamente en un gradiente magnético N-S muy marcado, A partir de este mapa se eligieron la ubicación de SEV's, ubicándolos preferencialmente en gradientes magnéticos, donde podría haber fracturas o fallas que aumentan la permeabilidad dada por la porosidad secundaria.

### 4.4 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Se presentan Los Sondeos Verticales Eléctricos más importantes en el área, Cabe aclarar que la resistividad de las calizas depende su grado de fisuración y del relleno de sus grietas

y cavidades en calizas compactas van de 1000 a 4000 Ohm.m, para zonas kársticas con fracturas rellenas de agua dulce encontramos valores menores a 1000 Ohm.m, coincidiendo con CONAGUA (2010a, 2010b) que reportan valores de 2000 a 4500 Ohm.m para calizas compactas, y valores de 100 a 300 Ohm.m a calizas con fisuras llenas de agua dulce.

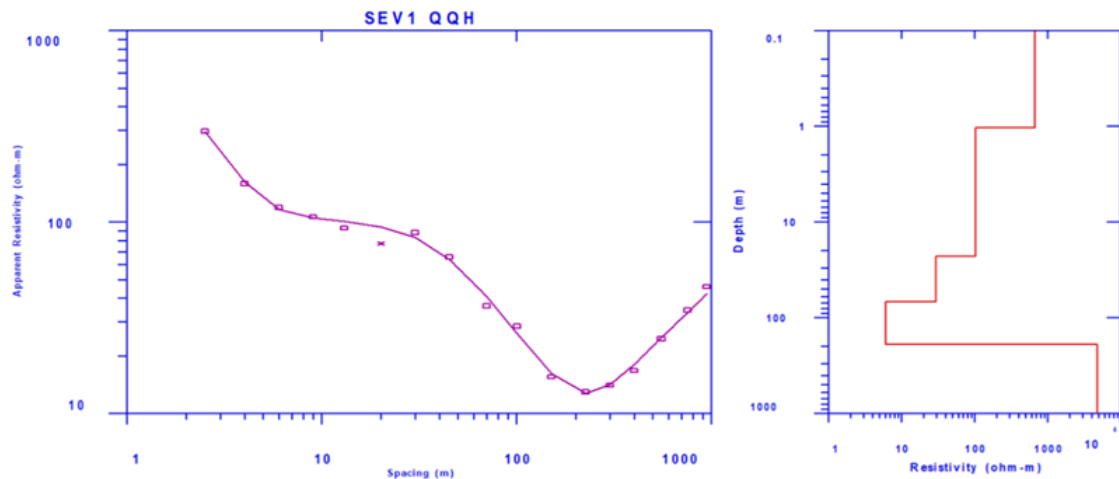


Figura 4.23 Sondeo Vertical Eléctrico 1, QQH.

La curva del SEV 1, tipo QQH, mostrada en la figura 4.23, se ubica al NW del área, cercano a la noria NY1, y al pozo PCB. Este SEV interpreta en su parte superior un estrato de alta resistividad de aproximadamente 700 Ohm.m lo que corresponde a yesos pocos mezclados con aluvi3n. El aumento de humedad con la profundidad define la segunda capa geoelectrica con una resistividad de 100 Ohm.m interpretada como yesos saturados. Posteriormente, la tercera capa como conglomerado saturado de baja resistividad 30 Ohm.m comparándolo con lo reportado por Mu1oz (2008), con un espesor del acuífero aproximado de 100 m. A mayor profundidad se encuentra la cuarta capa con resistividad de 8 Ohm.m, interpretada como limo-grava saturada en algunos sitios con lentes de conglomerado. Y, por último, la capa donde se encuentran las calizas de la formaci3n El Abra por sus altas resistividades mayores a 4000 Ohm.m.



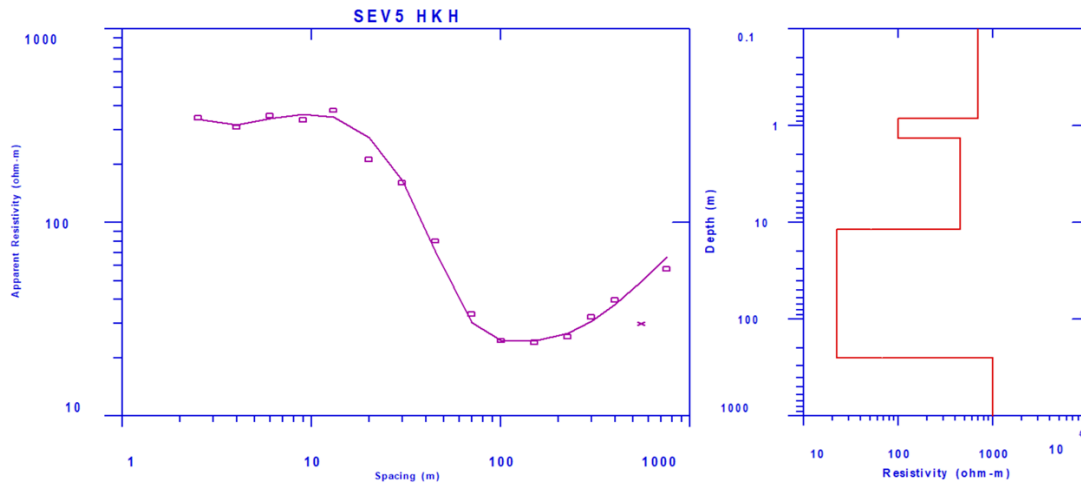


Figura 4.24 Sondeo Vertical Eléctrico 5, HKH.

El SEV 5, tipo HKH (figura 4.24) se ubica al Sur del área estudiada. Se observan tres capas; la primera por su alta resistividad de 300 Ohm.m es interpretada como el estrato de yesos. La segunda capa, por su resistividad de 20 Ohm.m es interpretada como conglomerado saturado con un espesor mayor de 250 m que subyace al estrato de yesos; este potente espesor de conglomerado saturado otorga a este sitio como muy favorable para la perforación de un pozo profundo. Y, por último, la tercera capa por su alta resistividad mayor a 1000 Ohm.m, interpretada como las Calizas de la Formación El Abra.

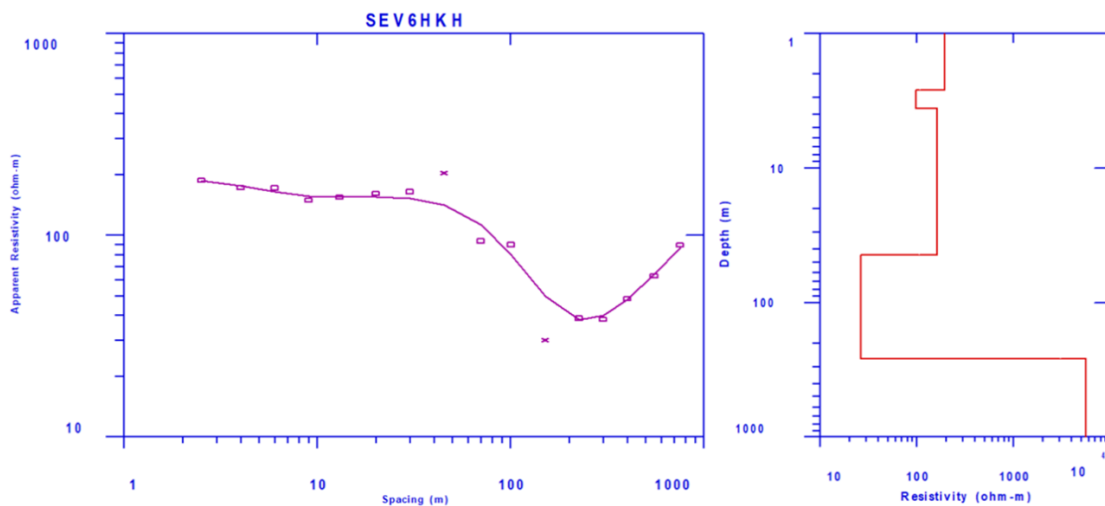


Figura 4.25 Sondeo Vertical Eléctrico 6, HKH

En el modelo del SEV 6, tipo HKH, de la figura 4.25, se modelaron cinco capas; la primera capa se interpreta como yeso por su alta resistividad de 200 Ohm.m. La segunda capa debido a su resistividad de 100 Ohm.m, se interpreta como un lente de aluvión. La tercera capa por su resistividad mayor a 100 Ohm.m, se interpreta como yeso saturado. Subyaciendo a la capa de yesos, la cuarta capa, por su baja resistividad de 20 Ohm.m, se interpreta como conglomerado saturado con un espesor aproximado de 150 m. Por último, la capa cinco, subyaciendo al conglomerado saturado por su alta resistividad mayor a 5000 Ohm.m se interpreta como las calizas de la Fm. El Abra.

#### 4.5 PERFILES A PARTIR DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

La investigación realizada en el ejido de Cerrito Blanco, por medio de los 15 SEV's, a partir de los cuales se construyeron cuatro secciones de iso-resistividad permitiendo determinar los horizontes capaces de transmitir agua en el área de estudio.

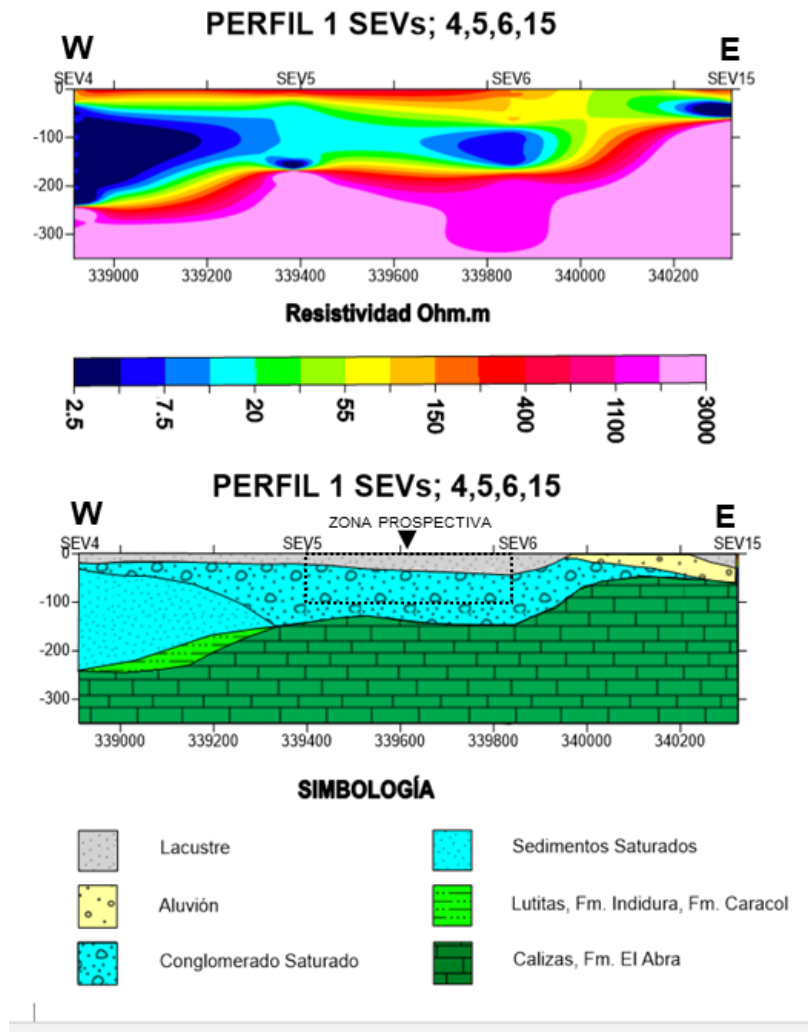


Figura 4.26 Interpretación geológica del Perfil 1 de los SEV's; 4,5,6,15.

En el perfil geoelectrico 1 obtenido a partir de los SEV's 4,5,6,15 se ubica en la parte sur del ejido Cerrito Blanco, con coordenadas extremas (338914, 2615284) W y (340333, 2615069) E, con una longitud total de 1440 m. En la figura 4.26 (A) se observa que en la superficie se encuentran una anomalía de altas resistividades de 90 a 400 Ohm.m, geológicamente interpretado en la figura 4.26 (B) como un estrato de yesos de aproximadamente 20 m de espesor de acuerdo a los reportado las resistividades y espesores reportadas por Muñoz (2008), lo que a su vez coincide con los espesores reportados por Martínez, (1971) y Motilla, (1973). En la figura 4.26 (A) se presentan anomalías en el estrato de yesos de baja resistividad de 20 – 90 Ohm.m interpretadas en la figura 4.26 (B) como fracturas rellenas de aluvi6n. Subyaciendo al estrato de yesos se encuentran resistividades de 20 – 90 Ohm.m, con una interpretaci6n geol6gica de un estrato de conglomerado de espesor variable de aproximadamente 20 m a 140 m lo cual concuerda con las resistividades y espesores reportadas por Muñoz (2008), y espesores reportados por CONAGUA (2010a, 2010b), otorgándole a esta porci6n central del perfil 1 la zona m6s 6ptima para la perforaci6n de un pozo, con intervalo de profundidad productor entre 40 y 150 m, aproximadamente. La figura 4.26 (A) en su parte oeste se observa una anomalía de bajas resistividades de 5 - 20 Ohm.m interpretada como limo debido a sus bajas resistividades. Subyaciendo se encuentran resistividades de 20 – 400 Ohm.m interpretadas como lutita de la Fm. Caracol y de la formaci6n Indidura, en correspondencia con las interpretaciones de CONAGUA, (2010a; 2010b). En la parte inferior se observan altas resistividades de 400 – 3000 Ohm.m interpretadas como calizas de la Fm. El Abra, en correspondencia con las interpretaciones dada por CONAGUA, (2010a, 2010b).

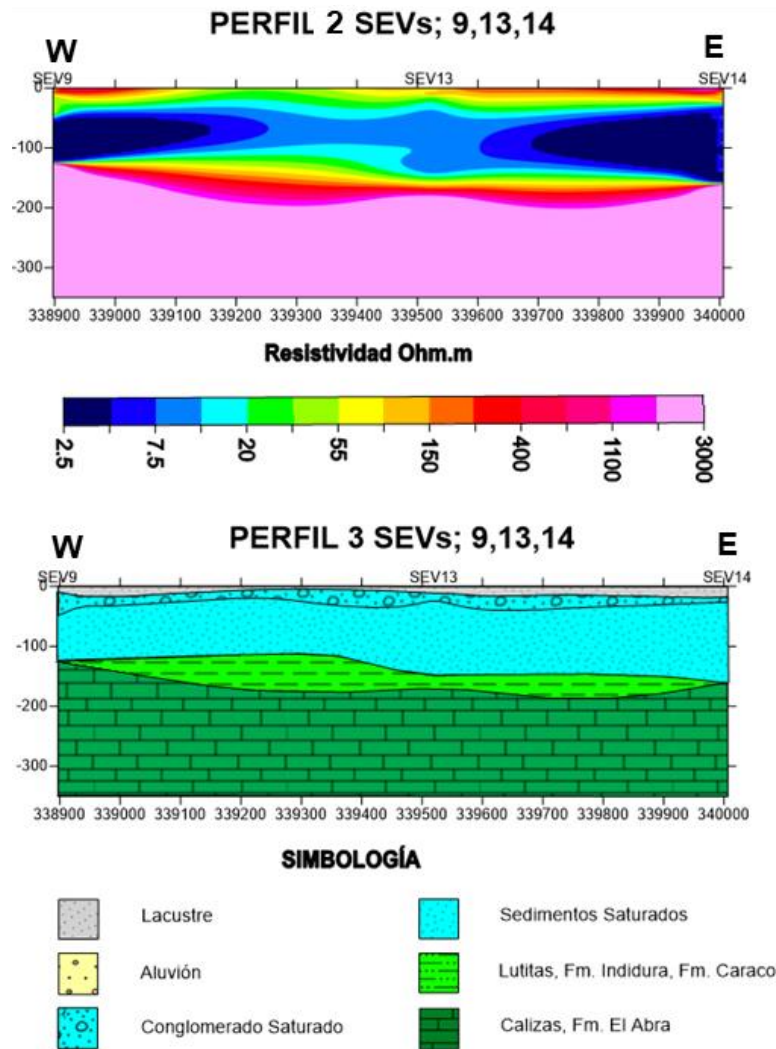


Figura 4.27 Interpretación geológica del Perfil 3 de los SEV's; 9,13,14.

La sección de la figura 4.27 se construyó a partir de los SEV's 9, 13,14, ubicada en la parte norte del área de estudio con las coordenadas externas (338911, 2617143) W y (340008, 2616615) E, con longitud de 1200 m. En la figura 4.27 (A) se observa una anomalía en la superficie de altas resistividades de 90 a 400 Ohm.m interpretada en la figura 4.27 (B) como un estrato de yesos con un espesor aproximado de 10 – 20 m. Subyaciendo, se observa una anomalía de resistividades de 20 – 90 Ohm.m que fue geológicamente interpretada como conglomerado saturado. En anomalías modeladas con resistividades muy bajas (5 a 20 Ohm.m), se interpretan como limo con algunos lentes de conglomerado de acuerdo en lo observado en perfiles cercanos a la zona. Subyaciendo a este estrato se observan una anomalía de rango de resistividad de 20 -150 Ohm.m interpretada como lutita-arenisca de la Fm. Caracol, y Lutitas-Calizas de la formación Indidura. Como última capa, se observa

una anomalía con altas resistividades de 400 – 3000 Ohm.m interpretadas como calizas de la formación El Abra.

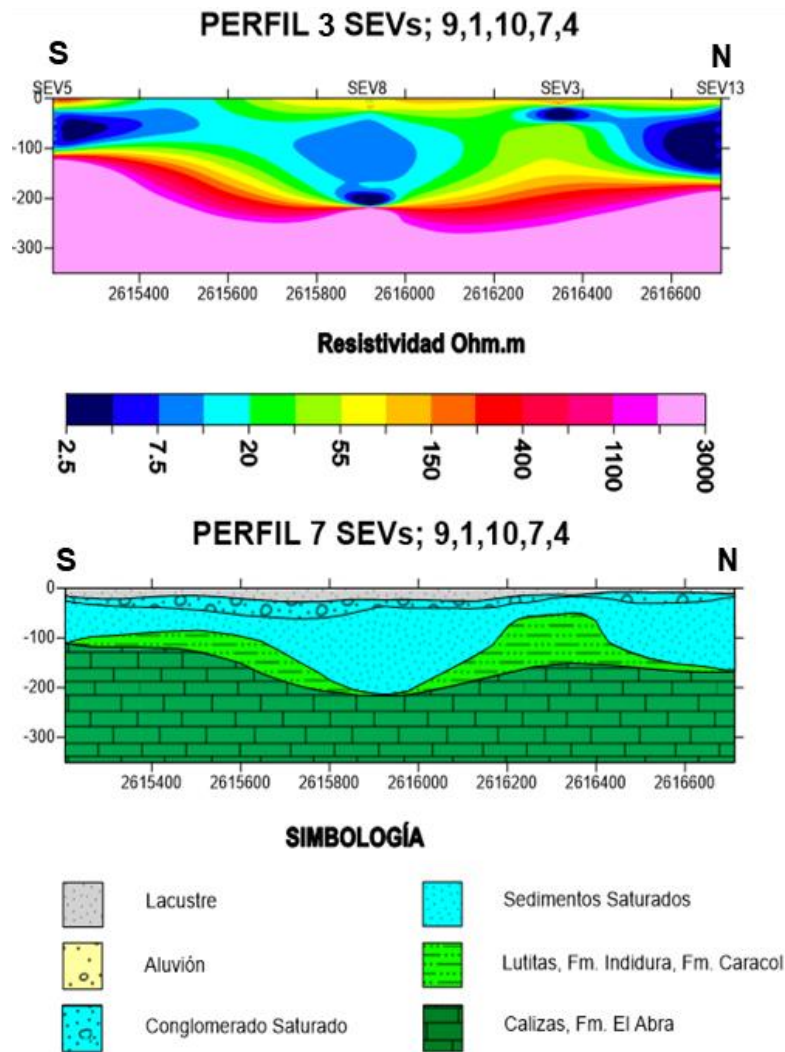


Figura 4.28 Interpretación geológica del Perfil 7 de los SEV's; 9,1,10,7,4.

Se modeló un perfil de SEV's 9,1,10, 7,3. Los cuales se midieron en la parte oeste del ejido de Cerrito Blanco, en dirección N-S en las coordenadas extremas (338911, 2617143) N y (338914, 2615284) S, con una longitud total de 1850 m. En la figura 4.28 (A) se observa en la superficie una anomalía alargada de altas resistividades de 90 – 400 Ohm.m interpretadas en la figura 4.28 (B) como un estrato de yeso, con espesores de 10 a 30 m. El cual descansa sobre una anomalía alargada de resistividades de 20 a 90 Ohm.m, interpretadas como conglomerado saturado. Debajo de estas se observan resistividades muy bajas de 5 – 20 Ohm.m, geológicamente interpretadas como limo con algunos lentes conglomerado, observando que su espesor se incrementa de Norte a Sur. Subyaciendo

resistividades de 20 - 90 Ohm.m son interpretadas como lutitas-areniscas de la Fm. Caracol y lutitas-calizas la Fm. Indidura, las cuales sobreyacen discordantemente a las calizas de la formación El Abra interpretadas así, por sus altas resistividades entre 400 – 3000 Ohm.m

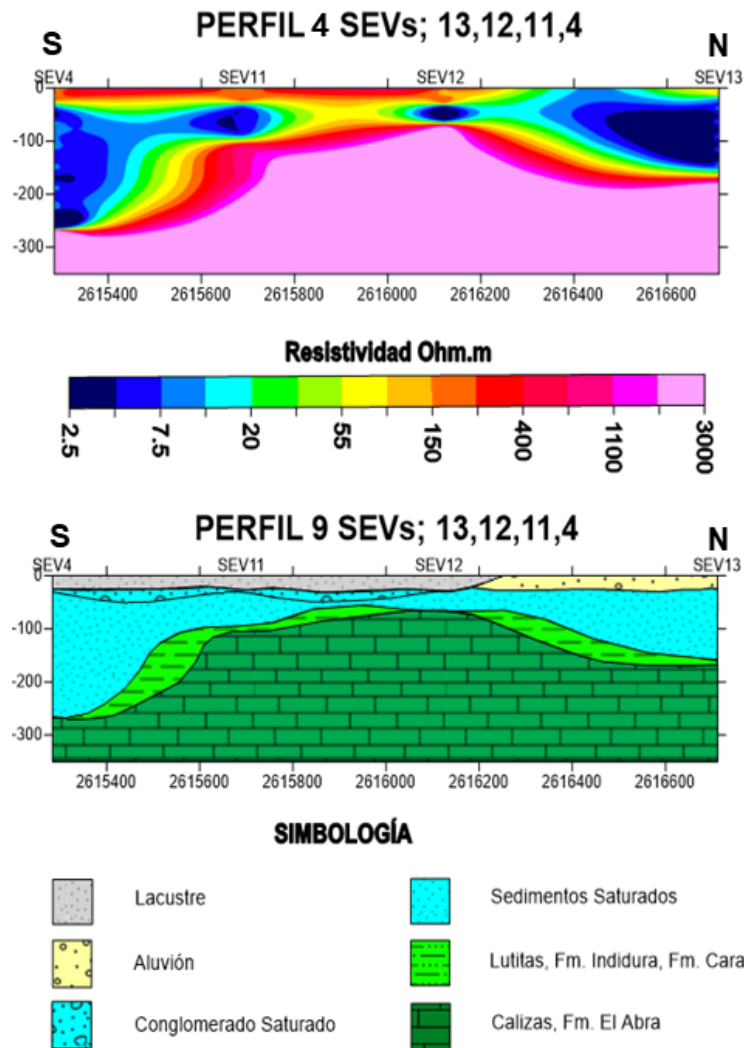


Figura 4.29 Interpretación geológica del Perfil 9 de los SEV's; 13,12,11,4.

El perfil 9 observado en la figura 4.29 es un perfil que corta el área en dirección NE-SW, conformado por los SEVs: 13, 12,11,4, con las coordenadas extremas (339523, 2616707) NE y (338914, 2615284) SW. En la figura 4.29 (A) se observan en la superficie del perfil de NE al centro anomalías de altas resistividades de 90 – 400 Ohm.m, interpretadas como un estrato de yesos figura 4.29 (B) y en la porción SW del perfil se observa que predomina una anomalía de resistividades de 20 – 90 Ohm.m, interpretada como aluvión. Subyaciendo al estrato de yesos se observan una anomalía de 20 – 90 Ohm.m, interpretada como conglomerado saturado el cual se observa que subyace al yeso, pero no al aluvión. Debajo

de esto se observa en la figura 4.29 (A) una anomalía alargada de NE – SW de resistividades de 5 – 20 Ohm.m, interpretada como limo con lentes de conglomerado que incrementa de espesor, hacia los extremos del perfil. Subyaciendo al limo se observan anomalías de resistividad 20 -150 interpretadas como lutitas-areniscas de la formación Caracol, y lutitas-calizas de la formación Indidura. Estas formaciones yacen sobre a altas resistividades 400-3000 Ohm.m, interpretada como calizas de la Formación El Abra.

#### 4.6 MAPAS A PARTIR DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

A continuación, se presentan varios mapas que se realizaron a partir de SEV's, tienen el propósito de analizar mejor el acuífero granular estudiado.

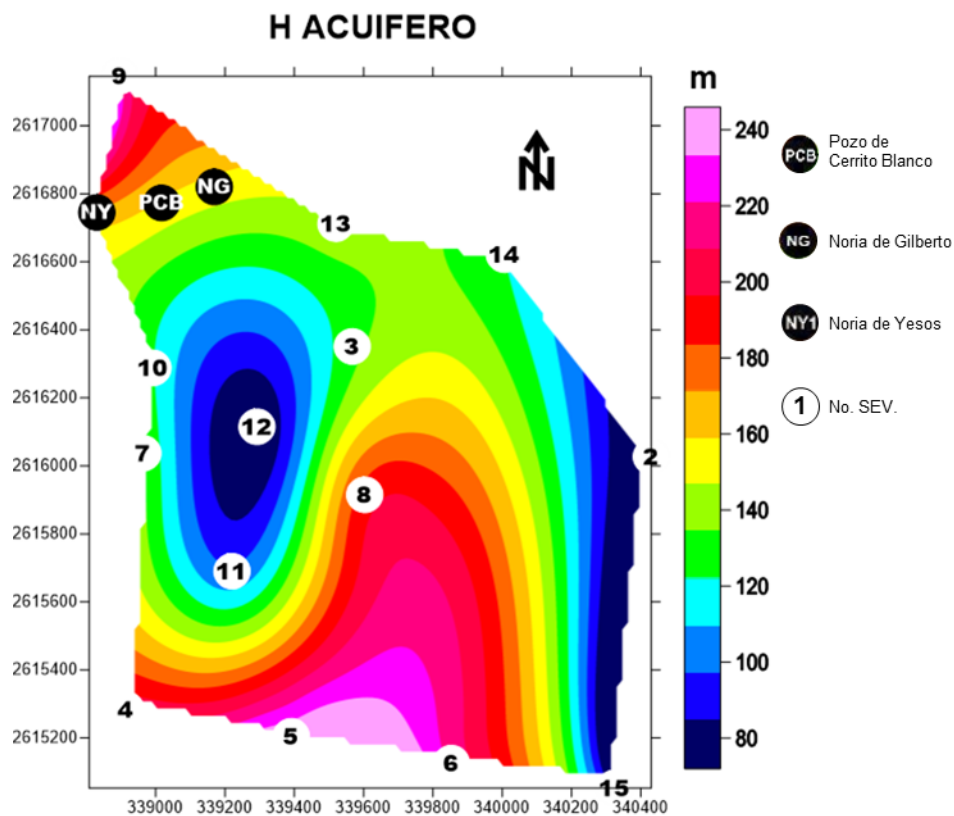


Figura 4.30 Mapa que representa espesor del acuífero en m.

En la figura 4.30 se observa que el espesor del acuífero el cual cubre en su totalidad el ejido tiene un área total de 220 ha. En la figura 4.30 se observa que el espesor del acuífero se incrementa notablemente hacia el S en los SEV's 5 y 6, y en menor medida hacia el NW en el SEV 9, por lo que, tomando en cuenta el espesor del acuífero, el área más factible para explotar el acuífero granular sería la definida por los SEV's 5 y 6. No obstante este

resultado, se requiere del análisis de la resistividad, y por consiguiente, de la resistencia transversal del acuífero.

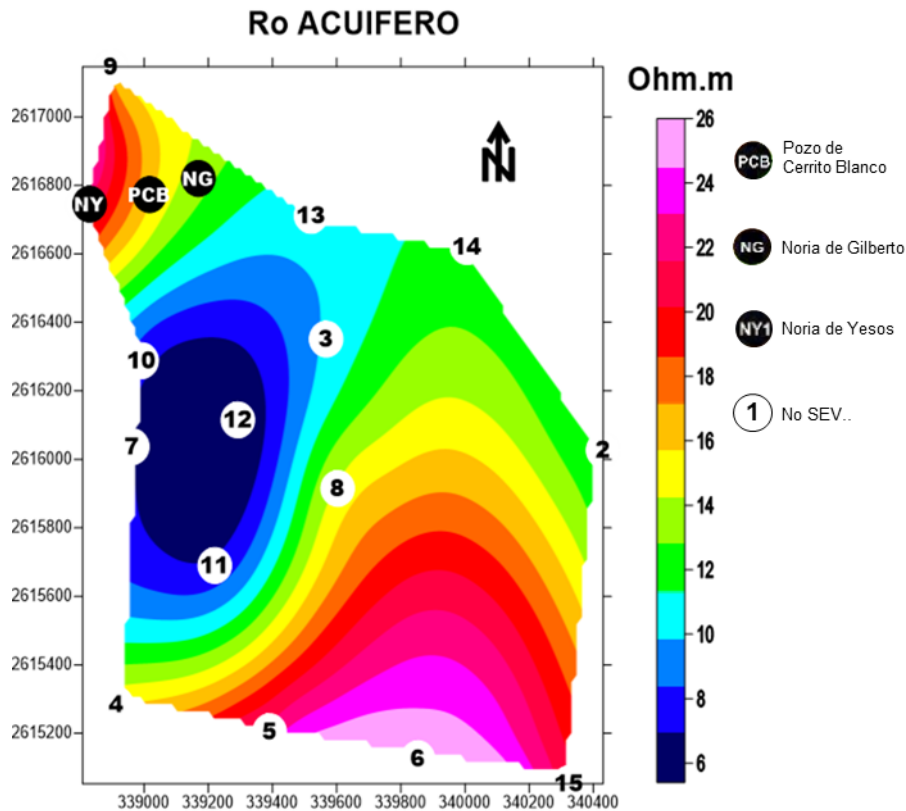


Figura 4.31 Mapa de resistividad del acuífero.

En la figura 4.31 se observa el mapa de resistividad para el acuífero. Anomalías de alta resistividad de 16 – 26 Ohm.m ubicadas al (SEV's 4, 5, 6, 8, 15) SW y al (SEV's 1, 9) NW del ejido, son interpretadas como conglomerado con matriz arenosa, mientras que la anomalía de bajas resistividades (6 - 14 Ohm.m) ubicada en la parte centro-oeste del sitio (SEV's 2, 3, 7, 10, 11, 12, 13, 14), es interpretada como el material limoso con lentes de conglomerado, lo que coincide con lo planteado por Muñoz Quintana (2008) y CONAGUA, (2010a, 2010b). Nuevamente, los SEV's 5 y 6 se ubican en una zona de conglomerado, de mayor permeabilidad y factible para la extracción de agua subterránea.



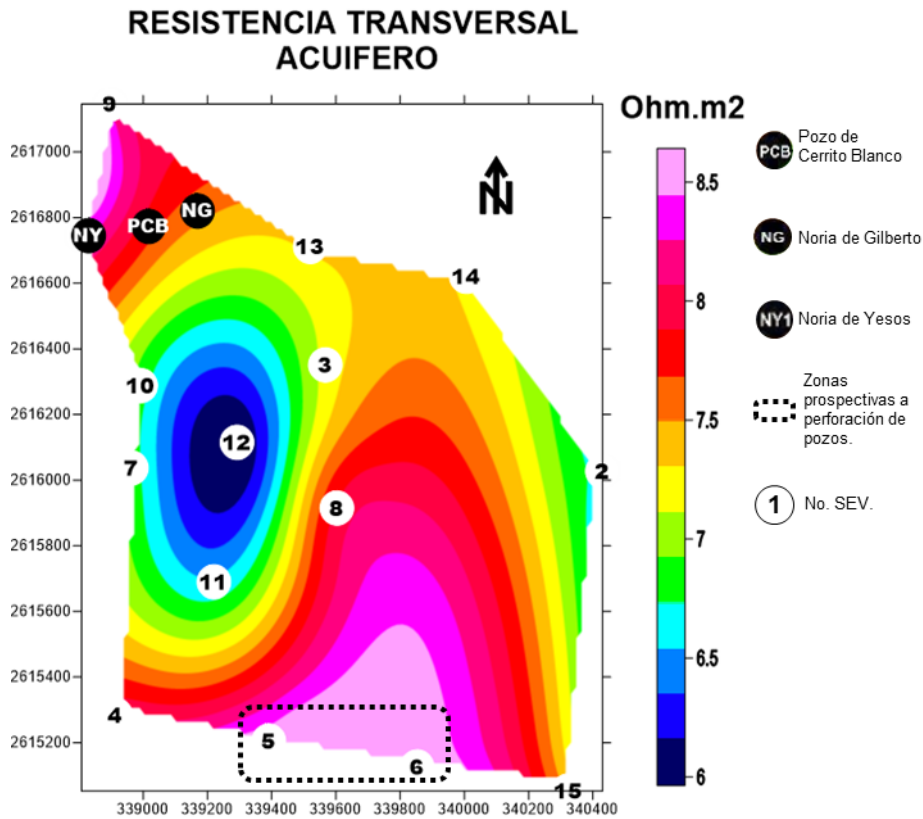


Figura 4.32 Mapa de resistencia transversal del acuífero.

La resistencia transversal ( $T = \rho \cdot h$ ) establece una solución de compromiso donde altas resistividades (conglomerado) y mayor espesor, aseguran un mayor potencial del acuífero. En la figura 4.32 se presenta el mapa de T para el acuífero, identificando zonas con material de mayor porosidad y mayor espesor. El área de mayor potencial de perforación son con valores altos de T (8 - 9 Ohm.m<sup>2</sup>) ubicadas al sur del área de estudio (SEV's 5, 6) ya que en estas el material predominante es el conglomerado y es donde los espesores son mayores. Por otro lado, el pozo PCB, así como la Noria de Gilberto NG, se encuentran sobre material permeable que puede dar altos rendimientos, por lo que se propone incrementar la profundidad de perforación del pozo PCB y noria NG en 100 y 130 m, respectivamente.

### CONDUCTANCIA LONGITUDINAL ACUIFERO

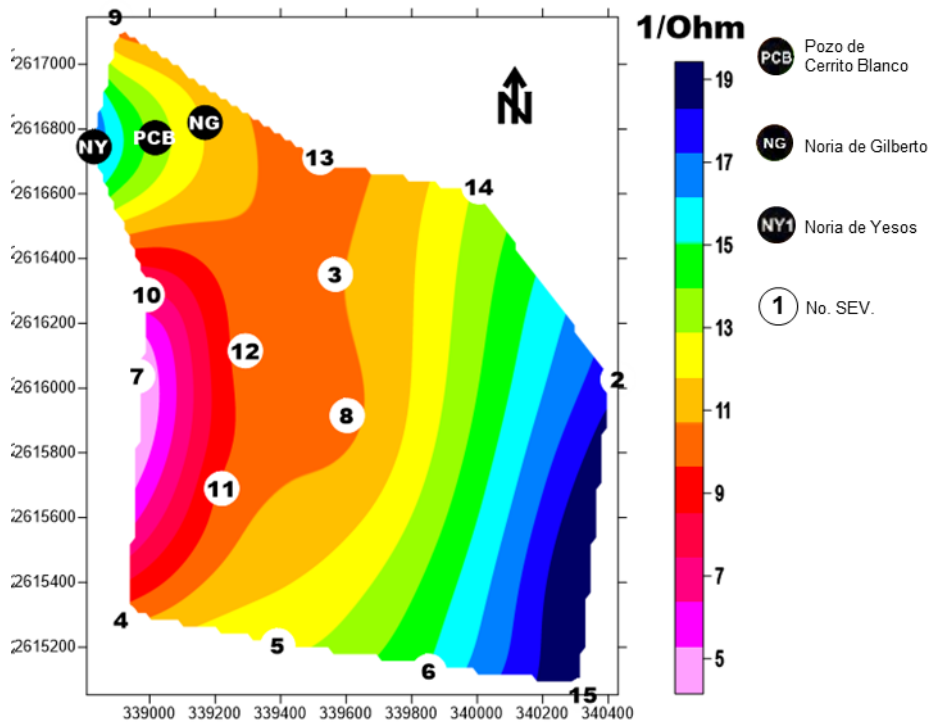


Figura 4.33 Mapa de conductividad longitudinal del acuífero.

En la figura 4.33 se observa una anomalía de alta conductividad longitudinal al oeste del área de estudio (SEV's 3, 7, 8, 10, 11, 12, 13) ( $S= 13 - 20$  1/Ohm.m) que se interpreta como material de menor permeabilidad, con mayor presencia de finos. En los extremos NW (SEV's 1, 9) y W (2, 5, 6, 14, 15) se observan anomalías de baja conductividad de 5 – 13, por lo que en estas zonas la permeabilidad es mayor.

### PROFUNDIDAD AL TECHO DEL ACUIFERO GRANULAR

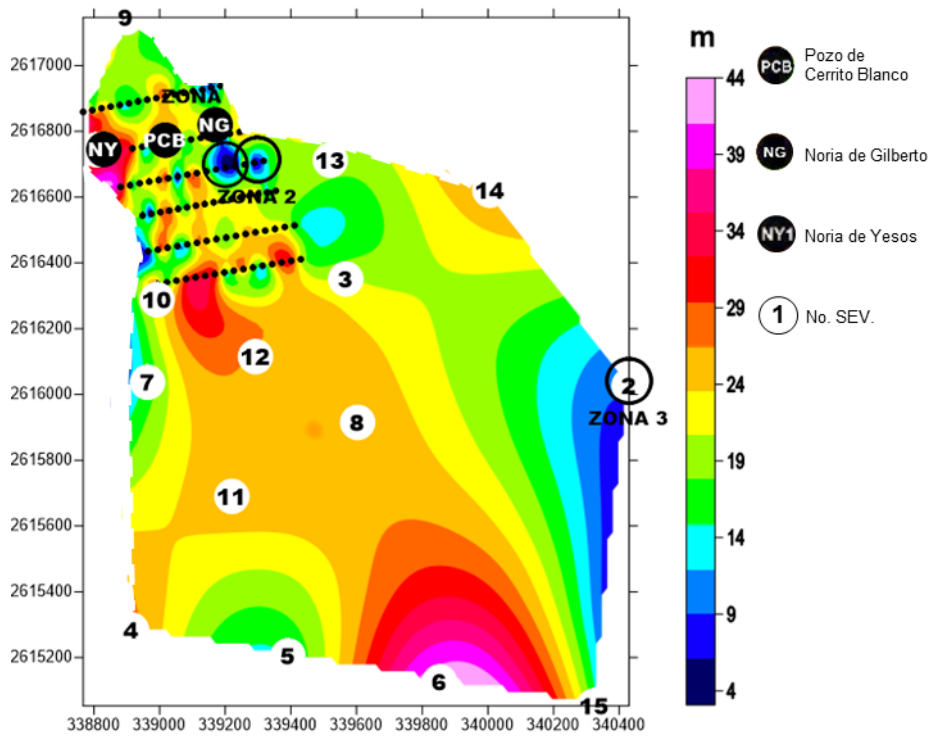


Figura 4.34 Mapa de espesor de Yesos en la Superficie tomando en cuenta la información aportada por los levantamientos de TRE y SEV.

El mapa de espesores de la capa superficial de yesos mostrado en la figura 4.34 se elaboró a partir de los datos de SEV's y TRE. Este mapa ofrece ubicaciones óptimas para la excavación de norias, de bajo costo, con rendimientos aceptables. Como zonas prospectivas para excavación de norias se identificadas en los círculos negros en la figura 4.34, con las coordenadas; primera zona (339298, 2616948) en la que se recomienda excavar hasta 20 m, segunda zona (339298, 2616714) en la que se recomienda excavar hasta 15 m, tercera zona (339200, 2616699) donde se recomienda excavar hasta 15 m, cuarta (340430, 2616041) donde se recomienda excavar hasta 20 m. Para la Norias de Gilberto (NG) se recomienda excavar 10 m más para obtener mejores rendimientos.

## CONCLUSIONES

La permeabilidad de los sedimentos limosos, 0.56 m/día, es marcadamente menor que la de la matriz del conglomerado 0.9 (m/día), señalando a esto últimos como favorables para ser explotados como acuífero, cuyo espesor en el sitio oscila entre 100 a 250 m, proponiendo como más prospectivos para perforación los altos espesores.

Los resultados obtenidos a partir del levantamiento de Sondeos Verticales Eléctricos proponen como zona prospectiva para la perforación de un pozo profundo un área ubicada al sur al sur del ejido, entre los SEV 5 y 6, donde el acuífero es de tipo conglomerado, de alta permeabilidad, con intervalo de profundidad productor entre 40 y 150 m, aproximadamente.

Los resultados de la aplicación del método de Tomografía de Resistividad Eléctrica muestran a detalle la variabilidad en los espesores del estrato yesífero superficial, el cual oscila mayormente entre 22 a 30 m, a excepción de áreas muy específicas donde el espesor decrece a valores menores a 7 m, siendo estos últimos los puntos propuestos como óptimos para la perforación de norias, al mismo tiempo que propone una solución para aumentar el rendimiento de la noria de Gilberto (NG) mediante el incremento de su profundidad en 10 m.

El único pozo existente en la zona de estudio (pozo PCB) se encuentra perforado mayormente en un estrato de yeso fracturado relleno de matriz limosa de bajo rendimiento. Se recomienda perforar 100 m adicionales de profundidad para alcanzar los lentes de conglomerados saturados y aumentar su rendimiento.

En un futuro, si las necesidades locales de agua para consumo humano lo requieran, se recomienda explorar el acuífero kárstico de la Fm. El Abra, el cual puede ofrecer agua no sulfatada y libre de As.

## BIBLIOGRAFÍA

Baranov, V., Naudy, H, 1964. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole; *Geophysics*; 29: pp. 67 – 79

Blakely, R. J., Simpson, R. W., 1986. Locating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51, 1494 - 1498.

Brionez, G.R., Razo S.I, 2008, Contaminación de aguas naturales por arsénico asociado a la actividad minero-metalúrgica, caso de estudio en San Luis Potosí, México. Researchgate.

Bueno P.A., 2005, Interpretación Hidrogeoquímica de los Sistemas de Flujo de la parte norte del altiplano Potosino, México. (Maestría), Universidad Autónoma de Nuevo León.

CIIC, 2019, <https://www.who.int/peh-emf/project/intorg/es/index1.html>, visto por ultima vez en febrero del 2019.

CONAGUA, 2015, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Matehuala-Huizache (2413), Estado de San Luis Potosí.

CONAGUA, 2010a, Estudio geohidrológico del acuífero Matehuala-Huizache, S.L.P. Convenio No. CNA-DLSLP-AT-IPICYT-10/03-RF-CC

CONAGUA, 2010b. Informe del acuífero Villa Hidalgo, S.L.P.. Convenio No. CNA-DLSLP-AT-IPICYT-10/03-RF-CC.

Cantos F.J., 1973. Tratado de geofísica Aplicada; 2º Edición, México.

Carrillo, B., 1971. La Plataforma Valles - San Luis Potosí; Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Vol XXXIII.

Chavez T., 2012. Evaluación de riesgos ambientales para sitios mineros: caso del distrito minero Santa María de La Paz. (Doctorado), Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

De la Peña Aponte E. J., 2009. Prueba de Tomografía Eléctrica como herramienta de prospección de Acuíferos en Puerto Cumarebo, Edo. Falcón, Universidad Simón Bolívar, 5-23, 45-58.

Delgado-Rodríguez, et al, 2011. Determination of hydraulic conductivity and fines content in soils near an unlined irrigation canal in Guasave, Sinaloa, Mexico. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 11, 13-31.

FAO, 2015. <http://www.fao.org/home/es/>, Visto por ultima vez en Agosto del 2018.

GEOEX, 2017. Verificación, evaluación y análisis geohidrológico investigaciones geofísicas rancho agrícola "Los Olivos" vecindades "E" comunidad San Isidro Mpio. Cedral, S.L.P. Guadalajara.

Geosoft Inc., 2015. This topic was last modified: Version 5.1.7 (2003-03-05)

González G.M., 2009. Evolución espacio temporal de la calidad de agua subterránea en el acuífero Cedral - Matehuala: alternativas de uso. (Maestría). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

INEGI, 2012. Estudio Hidrológico del estado de San Luis Potosí.

Henderson, R., Zierz I., 1949. The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity field. *Geophysics* 14, p. 508 - 516.

Henderson, R., 1970. On the validity of the use of the upward continuation integral for total magnetic intensity data. *Geophysics* 35, pp. 916 - 919.

Hernández, Barcena, G., Castillo, F., Avalos-Borja, M., Martínez-Villegas, N.V., 2017. Síntesis de arseniatos de calcio (guerinita, haidingerita y farmacolita) morfológicamente similares a los encontrados en suelos contaminados. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 33, 153-163. doi:10.20937/RICA.2017.33.01.14

Lanza R., Meloni A., 2006. *The Earth's Magnetism, An Introduction for Geologists*; Springer, Italy.

Martínez-Villegas, N., Briones-Gallardo, R., Ramos-Leal, J.A., Avalos-Borja, M., Castañón-Sandoval, A.D., Razo-Flores, E., Villalobos, M., 2013. Arsenic mobility controlled by solid calcium arsenates: A case study in Mexico showcasing a potentially widespread environmental problem. *Environ. Pollut.* 176, 114-122. doi:10.1016/j.envpol.2012.12.025

Muñoz Quintana, 2008. Modelo geológico del área de Cedral Matehuala y su relación con los sistemas de flujo subterráneo, S.L.P., México. (Maestría) Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Mussett E.A., Aftab K.M., 2009. *Looking Into The Earth (An Introduction to geological Geophysics)*; Cambridge University Press; New York, USA.

Nabiaghian, M. N., 1972. The analytic signal of two - dimensional magnetic bodies with polygonal cross - section: its properties and use for automated interpretation. *Geophysics* 37, pp. 507 - 517.

Nabighian, M. N., 1974. Additional comments on the analytic of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross - section. *Geophysics* 39, pp. 85 - 92.

OMS, 2018. <https://www.who.int/es>, visto por ultima vez en agosto 2018.

Orellana E., 1982. *Prospección Geoeléctrica en corriente continua*. Paraninfo.

Pelallo Martínez, 2006. Comportamiento Químico de arsénico en sedimentos de sistemas acuáticos contaminados. México. (Maestría) Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., Monroy, M., 2003. Arsenic and Heavy Metal Pollution of Soil, Water and Sediments in a Semi-Arid Climate Mining Area in Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution.* 152, 129-152.

Reeves, C., 2005. *Aeromagnetic Surveys, Principles, Practice y Interpretation*; Geosoft; Earthworks.

Reynolds, J., 1998. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, Instituto de Geofísica.

Butler, R., 2004. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes; University of Portland.

Rodríguez-Hernández, E., López-Doncel, R., Barboza-Gudillo, J.R., Cruz-Márquez, J., 2009. Análisis sedimentológico-facial de clastos formados de brechas calcáreas cretácicas de una zona transicional plataforma-cuenca en el centro de México. *Revistas Mexicanas de Ciencias Geológicas*. 26, 687-708.

Rodriguez-Rodriguez, R.M., 2016. Obtención de un modelo conceptual hidrogeológico de concentraciones de arsénico variables en agua superficial y subterránea en Matehuala, San Luis Potosí. (Licenciatura) Universidad de Sonora.

Ruiz-Huerta, E. A., Garza-Varela, A., Gómez-Bernal, J.M., Castillo, F., Avalos-Borja, M., SenGupta, B., Martínez-Villegas, N., 2017. Arsenic contamination in irrigation water, agricultural soil and maize crop from an abandoned smelter site in Matehuala, Mexico. *Journal Hazardous Materials*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.041>

Rylov, A., Shevvin, V., 2002. Theoretical calculation of rocks electrical resistivity and some examples of algorithm's application. In: *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*.

SGM, 2000. Carta geológico minera, Matehuala F14 - A25 San Luis Potosí y Nuevo León.

Siñeriz J., 1928. *Métodos Geofísicos de Prospección y sus aplicaciones a la resolución de varios problemas geológicos-tectónicos*. Instituto Geológico y Minero de España.

Soto, R, Zárate J., 2009. Informe Geológico-Minero Sierra El Azul Clave F14-A35, escala 1:50,000 Estados de San Luis Potosí y Nuevo León.

Tellez H., 2009. Estabilización por fosfato de plomo y cadmio contenidos en suelos de Villa de La Paz-Matehuala, S.L.P. (Maestría) Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Tauxe L, 2005. *Lectures in Paleomagnetism*. University of California, USA.

Tchernychev, M., 2004. MAGPICK - Magnetic map y profile processing. User Guide. 99 pp.

Valle E., 1984. *Apuntes de Introducción a la Geofísica*; UNAM, Facultad de Ingeniería.



Martínez-Ruiz, 1971. Estudio Geológico del Área El Milagro - Villa de Guadalupe Municipios de Guadalcázar y Villa de Guadalupe, S.L.P. (Licenciatura) Universidad Autónoma de san Luis Potosí.

## ANEXOS

### TABLAS DE COORDENADAS

#### COORDENADAS DE LOS PERFILES DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS RESISTIVIDAD

Número de Perfil	Oeste		Este	
	X	Y	X	Y
1	338917	2616748	339244	2616798
2	338881	2616631	339317	2616711
3	338948	2616544	339354	2616620
4	338965	2616435	339411	2616515
5	338993	2616336	339430	2616411

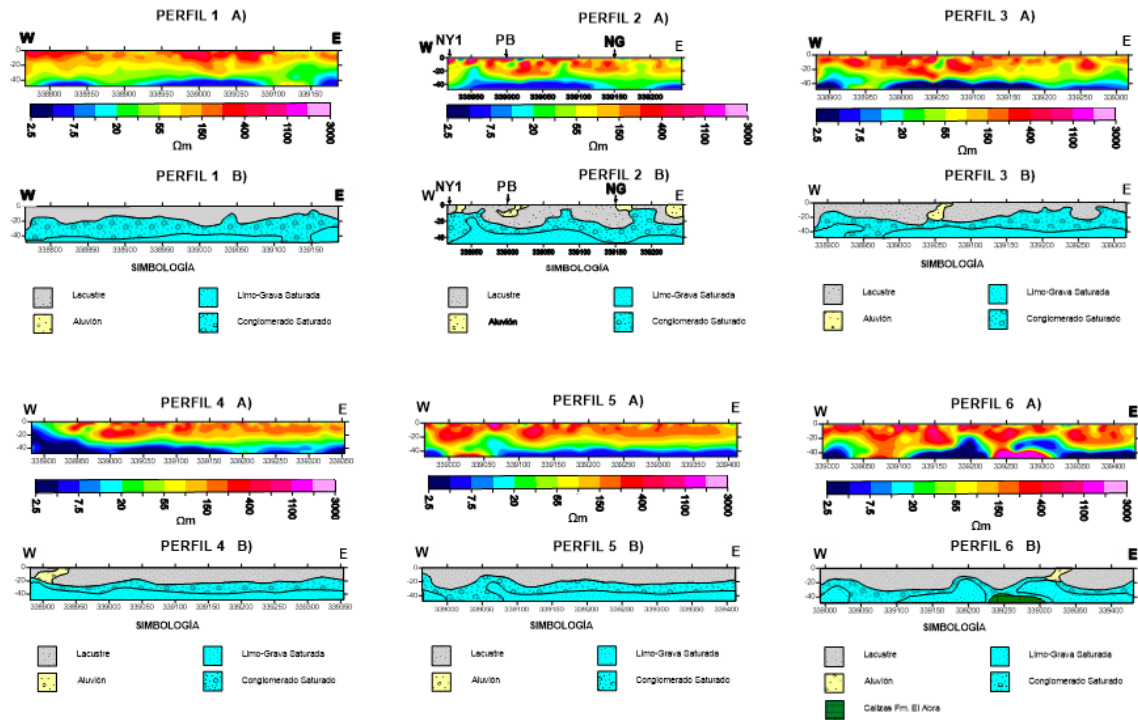
#### COORDENADAS DE LA UBICACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Número de Perfil	OESTE		ESTE	
	X	Y	X	Y
Perfil 1	338132	2617156	340179	2617114
Perfil 2	338145	2615594	340337	2616476
Perfil 3	338161	2616021	340216	2615847
Perfil 4	338171	2615515	340131	2616089

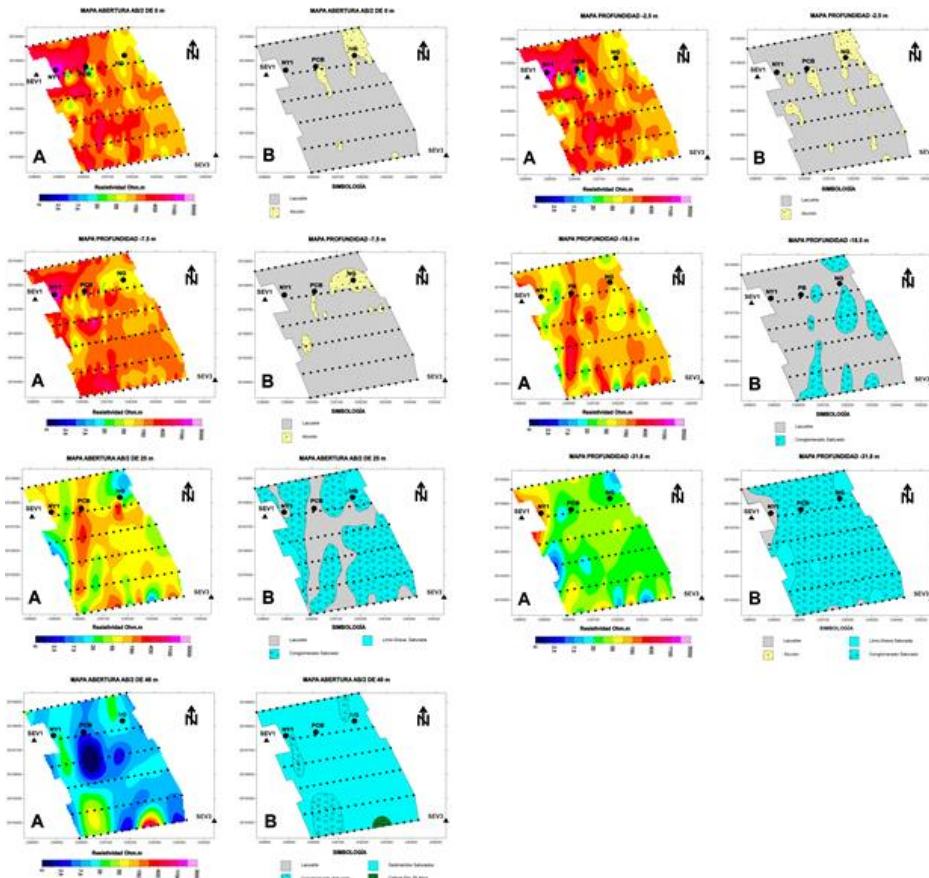
COORDENADAS DE LA UBICACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES.

<b>Número de SEV's</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
1	338822	2616754
2	340430	2616041
3	339567	2616351
4	338914	2615284
5	339384	2615225
6	339864	2615135
7	338956	2616022
8	339598	2615921
9	338911	2617143
10	338985	2616285
11	339213	2615726
12	339303	2616115
13	339523	2616707
14	340008	2616615
15	340333	2615069

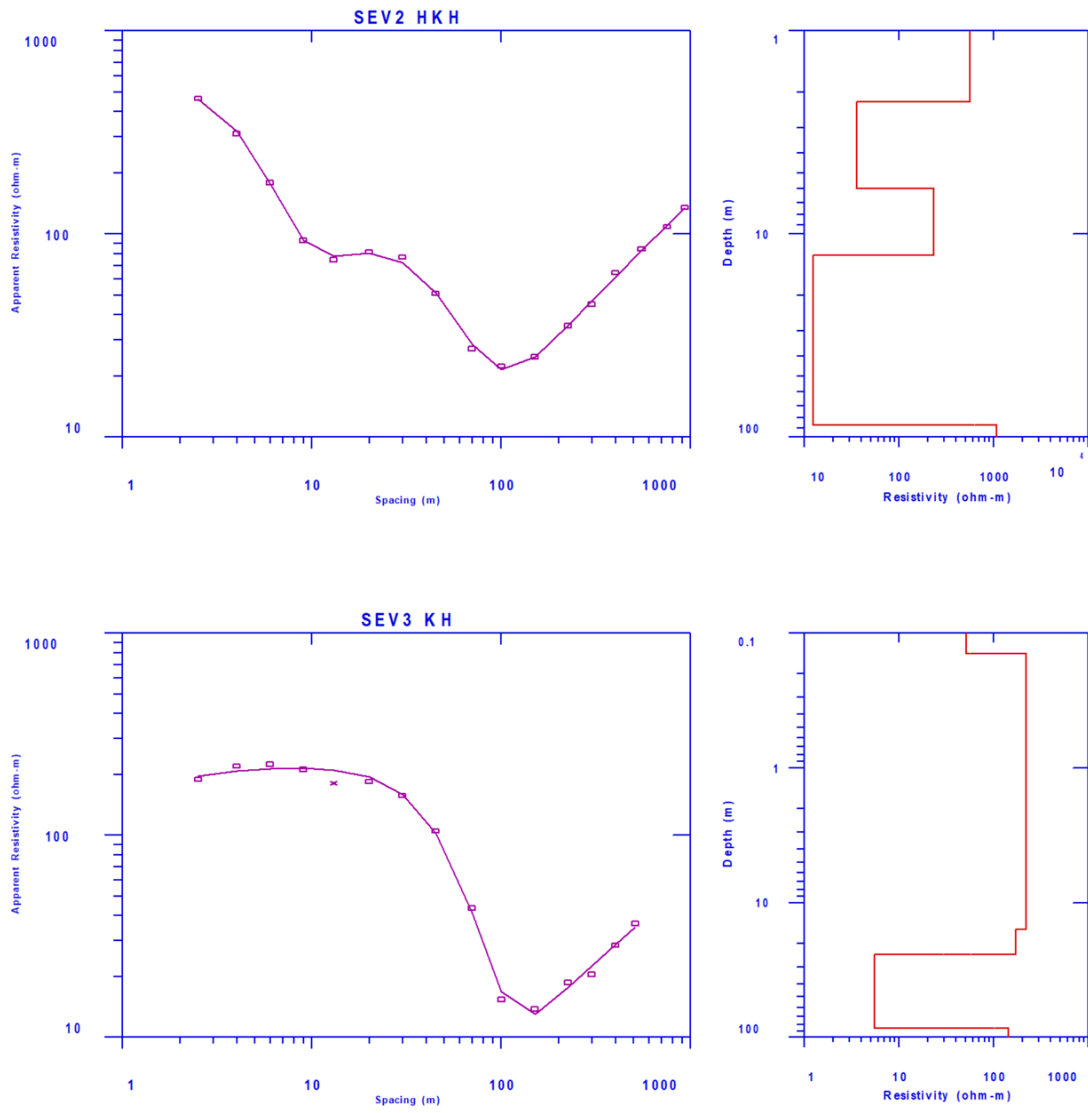
## MODELOS DE TOMOGRAFÍA ELECTRICA RESISTIVA

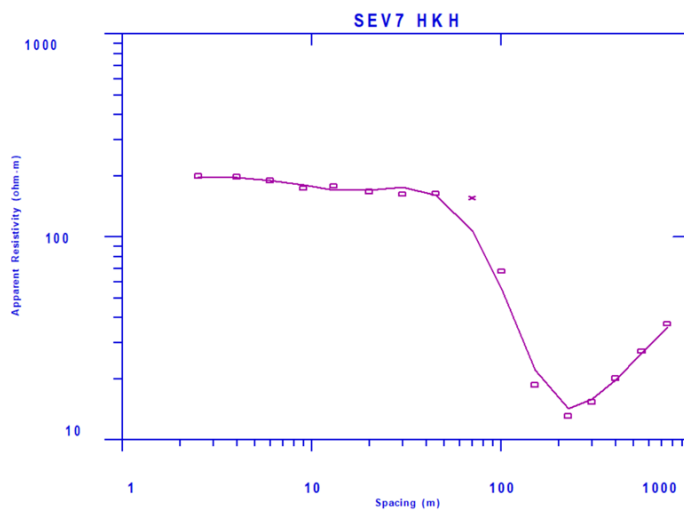
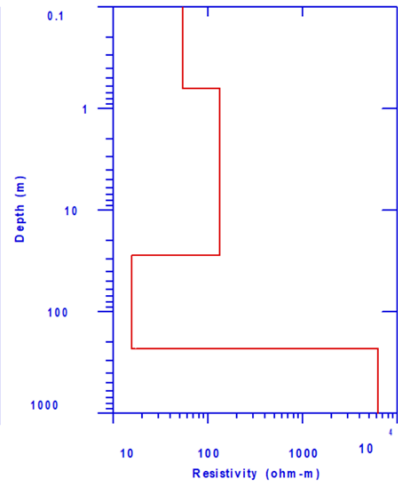
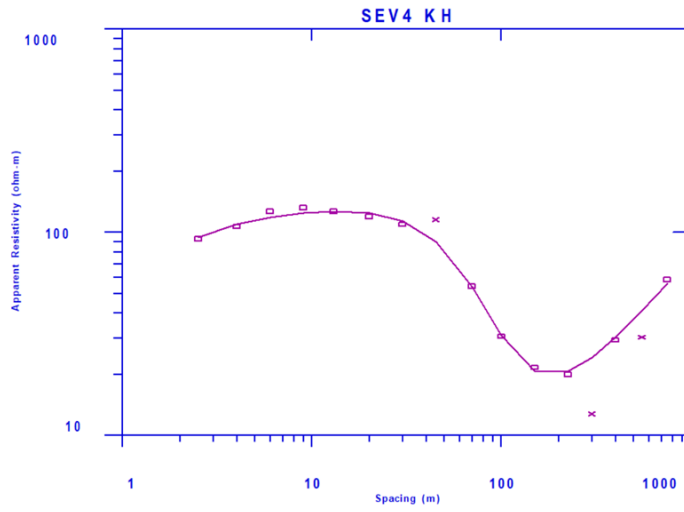


## MODELOS DE MAPAS DE TOMOGRAFÍA ELECTRICA RESISTIVA



## MODELOS DE LOS SONDEOS VERTICALES ELECTRICOS





**Instituto Mexicano del Petroleo**

