



**UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO**

DIVISIÓN DE INGENIERIAS

CAMPUS GUANAJUATO



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MINAS, METALURGÍA  
Y GEOLOGÍA

**APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOELÉCTRICOS PARA LA DETECCIÓN DE  
FALLAS GEOLÓGICAS OCULTAS EN EL SECTOR ESTE DEL ACUÍFERO-  
LAGUNA SECA, GUANAJUATO.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
LICENCIATURA EN INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA:

**IYARI ALEJANDRA SANCHEZ HURTADO**

DIRECTOR:

RAÚL MIRANDA AVILÉS

CODIRECTORA

DRA. YANMEI LI

GUANAJUATO, GTO, 2022

## Contenido

Resumen.....	4
Dedicatoria.....	5
Agradecimientos .....	5
Índice de figuras .....	6
1.0 Introducción .....	7
1.1 Planteamiento del problema. ....	7
1.2 Justificación.....	8
1.3 Objetivo general.....	8
1.4 Objetivos particulares . ....	8
1.5 Antecedentes. ....	8
Capítulo 2 - Marco Geológico e hidrogeológico.....	10
2.1 Localización del estudio Geofísico. ....	10
2.2 Marco Regional. ....	11
2.2.1 Geomorfología .....	11
2.2.2 Estratigrafía .....	11
2.2.2.1 Cretácico Inferior.....	12
2.2.2.2 Terciario Paleógeno .....	13
2.2.2.3 Terciario Neógeno.....	13
2.3 Geología Local .....	14
2.4 Graben de San Luis de La Paz.....	15
Capítulo 3 – Marco teórico.....	16
3.1 Teoría de la Prospección Geoeléctrica.....	16
3.2 Potencial espontaneo.....	17
3.2 Resistividad eléctrica.....	17
3.3 Ecuaciones gobernantes del método de prospección Geoeléctrica.....	18
3.4 Resistividad Aparente. ....	19
3.5 Sondeos eléctricos verticales. ....	19
3.5.1 Dispositivo Schlumberger.....	20
3.6 Factor Geométrico .....	21
3.7 Empalme.....	21
3.8 Ventajas y desventajas del arreglo Schlumberger. ....	21
Ventajas:.....	21

Desventajas: .....	22
Capítulo 4 – Metodología .....	22
4.1 Potencial Natural.....	22
4.1.1 Instrumentación Geofísica .....	22
4.1.2 Adquisición de datos de campo .....	23
4.2 SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL (SEV).....	25
4.2.1 Instrumentación Geofísica .....	25
4.2.2 Adquisición de datos de campo .....	25
4.2.3 Procesamiento de datos geofísicos SEV (Software).....	26
Capítulo 5 – Resultados.....	28
5.1 Secciones de PN. ....	28
5.2 Sondeos eléctricos Verticales (SEV) medidos. ....	31
5.3 Discusión .....	34
5.3.1 Potencial Natural.....	34
5.3.2 Sondeo Eléctrico Vertical .....	35
Capítulo 6 - Conclusiones y Recomendaciones.....	35
6.1 Conclusiones.....	35
6.2 Recomendaciones .....	36
Referencias.....	36
Anexos I.- SEV .....	39

## Resumen

El área de estudio se localiza 2 km al oeste de San Luis de la Paz, al extremo noreste del estado de Guanajuato. Este estudio surgió debido a la falta de información sobre fallas geológicas, en el relleno sedimentario del acuífero Laguna Seca, además de la importancia de involucrar métodos geoeléctricos para obtener más información del subsuelo, en este caso para determinar fallas ocultas o cubiertas. Se aplicó el método de Potencial Natural (PN) para detectar fallas ocultas en el sector Acuífero Laguna-Seca y probar por medio de la medición de sondeos eléctricos verticales (SEV) que el método de potencial natural identifica la existencia de fallas geológicas ocultas.

Para el Potencial Natural (PN) se elaboraron electrodos no polarizables de tubo pvc, 2 tapones de madera, incluyendo un tubo de cobre y dentro de esto una solución de sulfato de cobre. La mayor ventaja de este método es que todo el material es accesible y económico. En el trabajo de campo se midieron 6 secciones de Potencial Natural (PN).

Se realizaron 5 sondeos Eléctricos Verticales (SEV), usando el arreglo Schlumberger, con el objeto de corroborar las interpretaciones y las fallas identificadas con el método de PN. El espesor y resistividad de las capas de los SEV, fue determinada con el uso del Software IPIwin.

Como resultado se logró obtener una carta de isopotencial donde se puede observar que la falla se proyecta en zonas con alta permeabilidad, es decir, con mayor actividad electroquímica.

Las líneas de PN, levantadas de forma perpendicular a la falla hipotética, demostraron su existencia. De acuerdo con la interpretación existen varias fallas subparalelas ocultas.

La comprobación de la existencia de la falla que en este trabajo denominamos “Laguna Seca” pone en evidencia la existencia de otras fallas subparalelas al norte y al sur de esta. En la Cuenca de la independencia, particularmente en el sector de Laguna Seca, no habían sido cartografiadas fallas con esta orientación NE-SW que afectaran al relleno sedimentario Plioceno-Pleistoceno.

Se comprobó que los métodos geoeléctricos aplicados en este trabajo, funcionan para identificar fallas ocultas. La falla “Laguna Seca”, es una falla de tipo normal con el bloque hundido de forma escalonada hacia el sur, la cual está segmentada por fallas sub-paralelas al trazo principal.

## Dedicatoria

A mis padres, Rosaura y Marco Antonio, gracias por enseñarme el camino de la superación y ser el motor que impulsa mis sueños y esperanzas.

A mi hermana María del Carmen, por apoyarme y motivarme a ser una mejor versión cada día.

A mis abuelos Fidel, Estela, Guadalupe y Rosa por llenarme de amor y alegría.

A mis amigos por permitirme aprender más de la vida a su lado.

Esto es posible gracias a ustedes.

## Agradecimientos

Agradezco profundamente al Doctor Raúl Miranda Avilés por el apoyo y dedicación en este trabajo, sin su paciencia y sus virtudes no lo hubiese logrado tan fácil. A la Doctora Yanmei Li por creer en mí y brindarme todo el apoyo necesario.

Al doctor Edgar Ángeles Moreno, a la doctora María Jesús Puy Alquiza, M en C. Viridiana Piña González por sus útiles consejos y su tiempo empleado.

A mis profesores, les debo mis conocimientos, gracias por guiarnos por el camino de la excelencia y sus palabras de aliento en todo momento, son los mejores mentores.

A mis amigos y compañeros que fueron parte de esta maravillosa aventura, me llevo grandes aprendizajes y lecciones de vida.

Beca otorgada por el proyecto 129/2021 titulado “Modelo hidrogeoquímico conceptual de la Cuenca Alta del Rio Laja en el estado de Guanajuato. Financiada por la Universidad de Guanajuato.

## Índice de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio. A) Área de estudio dentro de la cuenca Independencia, imagen WorldView. B) Zoom de la imagen a Satélite del área. C) Imagen de Satélite ASTER procesada (4/1, 3/1, 2/1), donde se muestra el lineamiento de la posible falla.

Figura 2. A) Provincias fisiográficas donde se ubica el área de estudio. Sierra Madre Occidental (SMOcc), Mesa Central (MC), Sierra Madre Oriental (SMOr). B) Modelo Digital de Elevaciones de la parte SE de la Mesa Central, indicando los principales sistemas de fallas (Líneas negras).

Figura 3. Geología del área de estudio. Modificada de la carta Geológica F14-C35 1:50 000, Servicio Geológico Mexicano, 2008.

Figura 4. Columna estratigráfica (modificada de SGM, 2008 y Aceves, 2020).

Figura 5. Área de estudio y localización de los Sondeos Eléctricos Verticales y de Potencial Natural. La línea azul discontinua corresponde al trazo de la falla hipotética estudiada en el área de estudio.

Figura 6. Esquema representativo de la resistividad (modificado de Estrada et, al. 2013).

Figura 7. Esquema del arreglo de los electrodos A y B con relación a M y N.

Figura 8. Esquema representativo de las variantes de resistividad medidas en el Sondeo Eléctrico Vertical.

Figura 9. Ejemplo de separación entre electrodos por el Dispositivo Schlumberger.

Figura 10. Sulfato de Cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) y Agua destilada.

Figura 11. Tubo de cobre previamente introducida en el trozo de madera.

Figura 12. Tapones de madera ya saturados de sulfato de cobre.

Figura 13. Electrodo terminado antes de sellarlo con la cinta.

Figura 14. Estación base desde la cual se toman las lecturas.

Figura 15. Diagrama del método para el electrodo base.

Figura 16. Registro de los resultados de campo para el primer método.

Figura 17. Diagrama del método gradiente.

Figura 18. Colocación del equipo y los instrumentos necesarios.

Figura 19. Diagrama Sondeo Eléctrico Vertical, con arreglo Schlumberger. Líneas de corriente (rojo), líneas de potencias (azul).

Figura 20. Datos requeridos en el software IPIwin.

Figura 21. Gráfica de cada punto después de ingresar los datos al software IPIwin.

Figura 22. Resultado con 2.91% como margen de error.

Figura 23. Gráficos de gradiente de Potencial Natural. Las líneas de sección se midieron perpendiculares a la falla explorada. La ubicación de las líneas se encuentra en la figura 3.

Figura 24. Sección medida paralela a la línea D de la Figura 20.

Figura 25. Carta de Isopotencial obtenidos por el método del Potencial Natural.

Figura 26. Columnas de las secciones A, B y E obtenidas mediante Sondeos Eléctricos Verticales SEV.

Figura 27. Columnas de las secciones C y D obtenidas mediante el Sondeos Eléctricos Verticales.

## 1.0 Introducción

### 1.1 Planteamiento del problema.

El Agua Subterránea de los acuíferos en el Estado de Guanajuato se encuentra sobreexplotada (CONAGUA, 2020). Tomando en cuenta lo anterior es muy importante conocer la geometría y características geológicas de los acuíferos para aplicar con mayor certeza modelos de diferente índole (geohidrológicos, geoquímicos, hidrogeoquímicos, etc). Mucha de la información geológica del subsuelo no se conoce o debido a su naturaleza es difícil conocer. Ejemplo de esta información geológica poco conocida o no observable desde la superficie, son las fallas geológicas enterradas o cubiertas posteriores al relleno sedimentario de origen Cuaternario que no presentan manifestaciones morfológicas o geológicas en superficie. Para identificar estas estructuras es necesario emplear métodos geofísicos indirectos como los métodos geoelectricos.

Los métodos geoelectricos tienen como propósito determinar propiedades geoelectricas de los materiales del subsuelo, con lo que es posible delimitar cuencas, detectar acuíferos, así como para determinar anomalías en el subsuelo como en este caso fallas (Auge, 2008). Algunas ventajas de estos métodos es que suelen ser rápidos en su aplicación y algunos son económicos. En cuanto a las desventajas es que los resultados pueden ser diferentes si se toman en días o incluso horas distintas y esto se debe a variables naturales y antrópicas como podría ser líneas eléctricas cercanas que interfieren con los equipos, humedad relativa que exista ese día en el suelo, la temporada del año ya que durante el verano hay constantes lluvias, corrientes telúricas, por mencionar algunas (Auge, 2008).

En este trabajo se usaron dos métodos, el Potencial Natural y el Sondeo Eléctrico Vertical.

El Potencial Natural (PN) o Potencial Espontáneo (SP) es un método geoelectrico, el cual mide el potencial natural de la Tierra usando electrodos no polarizables enterrados en el suelo y conectados a un voltímetro. Este método es muy económico, se puede construir fácilmente,

y básicamente consiste en enterrar cada electrodo a cierta distancia, conectados por un cable con un voltímetro donde se mide la diferencia de potencial entre electrodos; la mayor desventaja de este método es que es relativamente inestable y los resultados no siempre son los mismos si se toma en distintos días en un área (Randall, 1984).

El Sondeo Eléctrico Vertical es el más utilizado en áreas donde se desea delimitar algún acuífero ya que tiene como ventaja la facilidad de uso, además de que ya hay varios softwares que están diseñados para realizar la interpretación de resultados mediante gráficas o secciones.

## 1.2 Justificación.

Uno de los grandes problemas en México y el estado de Guanajuato es la sobreexplotación y contaminación de acuíferos (CONAGUA, 2020), por lo que contribuir con información y métodos que permitan definir las geometrías de los acuíferos es muy importante. En este trabajo proponemos el uso de métodos indirectos accesibles y económicos. Proponemos el uso de métodos geoelectricos para identificar fallas geológicas ocultas o cubiertas por relleno sedimentario detectadas a profundidades de los 6 a 8 metros. En el caso del método de potencial natural (PN), la aplicación del método, desde la construcción del equipo de medición y la construcción de electrodos es posible con material que se puede adquirir en cualquier ferretería. El presente trabajo de investigación pretende probar que el método de PN es útil para identificar fallas geológicas cubiertas.

En la figura 1 C se puede observar la imagen a satélite en la cual se observa el lineamiento del cual surgió la hipótesis de la existencia de la falla NE-SW oculta ya mencionada.

Al contar con un método accesible y económico para identificar fallas geológicas cubiertas, contribuiremos en mejorar los modelos hidrogeológicos.

## 1.3 Objetivo general.

Utilizar métodos geoelectricos como el Potencial Natural (PN) y Sondeos eléctricos Verticales (SEV) para la detección de fallas geológicas ocultas en el sector este del acuífero-Laguna Seca, en el estado de Guanajuato.

## 1.4 Objetivos particulares .

- Aplicar el método de Potencial Natural (PN) en el sector este del acuífero Laguna Seca, para detectar fallas geológicas ocultas.
- Probar por medio de la medición de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) que el método de Potencial Natural identifica la existencia de fallas geológicas ocultas.

## 1.5 Antecedentes.

Alanis Ruiz (2002) en su tesis de licenciatura de Ingeniero Geólogo con el título de “Evolución Geológica de la Cuenca de la Independencia y sus alrededores, estado de Guanajuato, México” identifica las orientaciones de los principales sistemas de fallas en la cuenca. Se



realizó una correlación estratigráfica de las unidades presentes, además del análisis de la evolución geológica de la zona.

Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego (2002) estudiaron “El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: Implicaciones en la deformación post-Eocénica del centro de México”, estimó el potencial de reactivación para algunas de las fallas post-Eocénicas por el evento de extensión de Oligoceno en el centro de México, también identifican y describen las características estructurales y la orientación de dichos sistemas.

Ortega-Guerrero (2009) publicó “Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México”, fue desarrollado en la zona de la cuenca de la independencia, donde detectó mediante estudios hidrogeoquímicos que el agua es de origen meteórico y durante la recarga no ocurrieron procesos de evaporación.

Avilés Jasso (2019) realizó su tesis de Maestría en Ciencias del Agua titulada “Análisis geoestadístico bayesiano para determinar la evolución de la disponibilidad de agua subterránea en el Acuífero Independencia, Guanajuato”, abarcando la región de San Luis de La Paz, en donde identificó que la serie de datos hidrológicos derivados de los pozos del área no siguen geoestadísticamente una distribución normal, además de que hay datos atípicos.

Castro Aceves (2020) realizó su tesis de licenciatura titulada “Análisis cartográfico y geoquímico en la zona sur de la Mesa Central en el área entre San Luis de la Paz y Tierra Nueva, México “localizada cerca del área de estudio, dicho trabajo se desarrolló en los municipios de San Luis de la Paz y Tierra Nueva, donde se obtuvo una carta geológica de la zona, datos geoquímicos, estratigráficos y geocronológicos de ese sector de actualizados de la cuenca independencia.

Peter S.K. Knappett, et al., (2020) el estudio abarca la cuenca la Independencia, Guanajuato. En el estudio se realiza un análisis en los pozos del área para identificar el aumento en las concentraciones de arsénico (As), los análisis mostraron una relación de las altas concentraciones con el pH, la alta temperatura y las altas concentraciones de fluoruro (F), molibdeno (Mo), litio (Li), sodio (Na) y sílice (Si), así mismo hay bajas concentraciones de calcio (Ca) y nitrato (NO<sub>3</sub>). Concluyendo que dichas concentraciones altas de arsénico pueden llegar a niveles tóxicos debido a la sobreexplotación para la agricultura.

Cesar Castro, et al., (2020) realizó un trabajo en la cuenta Independencia el cual consistió en realizar un levantamiento geofísico en CI en donde identificaron la geometría de las unidades hidrológicas apoyándose de Audio Magnetotélurico, Sondeos Eléctricos Verticales y electromagnéticos, teniendo como resultado que, aunque existan dos unidades hidrológicas estas no se pueden distinguir verticalmente.

## Capítulo 2 - Marco Geológico e hidrogeológico.

### 2.1 Localización del estudio Geofísico.

El área de estudio se encuentra a 2 km al oeste de San Luis de la Paz el cual está situado al noreste del estado de Guanajuato (Figura 1 A); colinda con el municipio de Dolores Hidalgo al oeste, San Diego de la Unión al norte, San Miguel de Allende al sur y Xichú al este. Dicho estudio se realizó en un polígono de 10 km<sup>2</sup>.

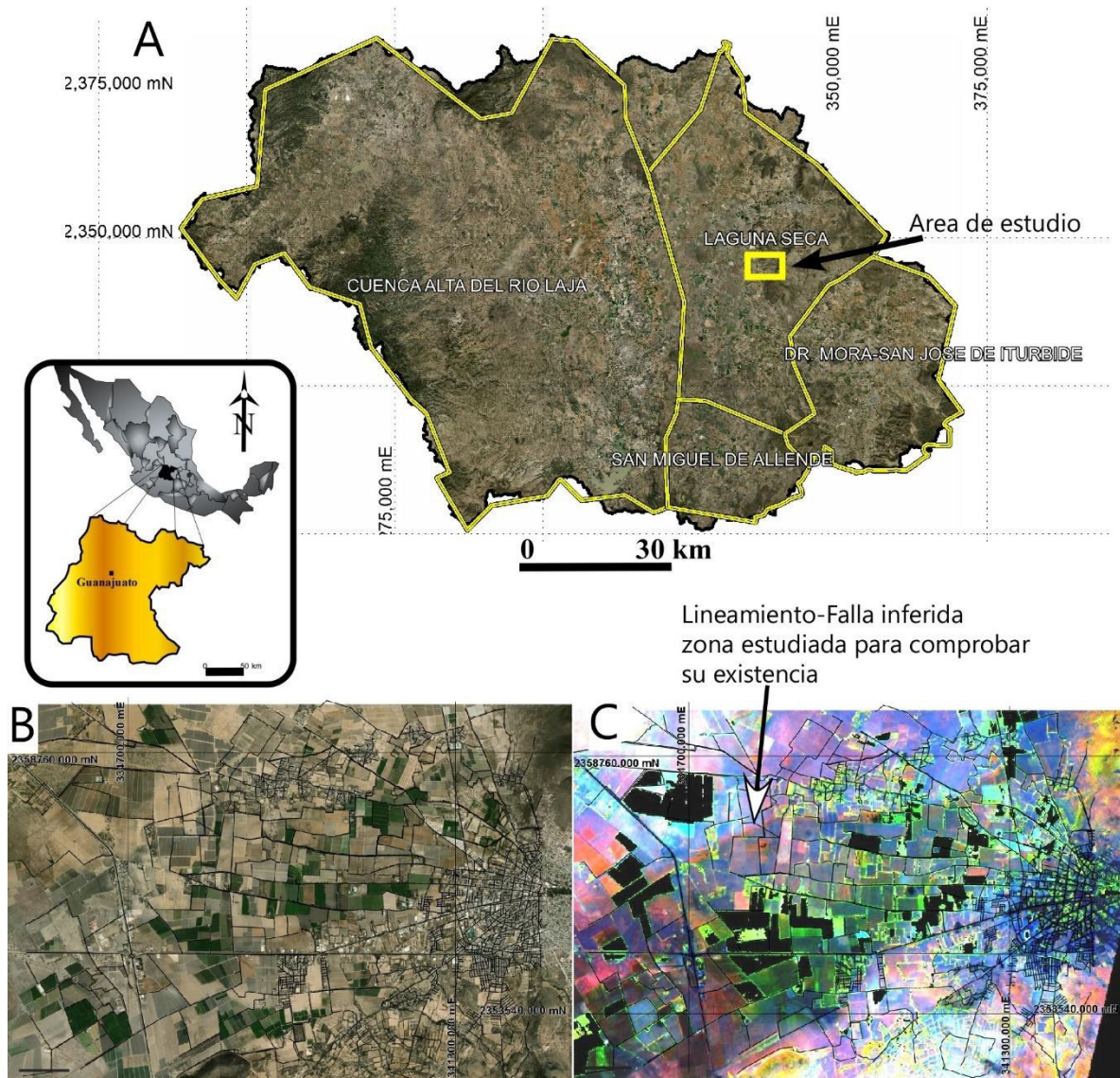


Figura 1. Localización del área de estudio. A) Área de estudio dentro de la cuenca Independencia, imagen WorldView. B) Zoom de la imagen a Satélite del área. C) Imagen de Satélite ASTER procesada (4/1, 3/1, 2/1), donde se muestra el lineamiento de la posible falla.

Para acceder a la zona de estudio se viaja a lo largo de la autopista número 67 que va de San Luis Potosí a Santiago de Querétaro, tomando desviación 1.85 km después del Cruce San Luis de la Paz, hacia los poblados de La Gardenia y San Martín (Figura 1 B).

El área de estudio cubre el extremo suroeste de la carta F14-C35 1:50 000 y se ubica en la parte central del acuífero Laguna Seca (Figura 2), forma parte del municipio de San Luis de la Paz, además de otros municipios que son Dr. Mora, San José Iturbide, San Diego de la Unión y Dolores Hidalgo.

Las secciones se realizaron tratando de cortar la falla oculta que se está estudiando, la cual cruza la autopista 67.

## 2.2 Marco Geológico Regional.

### 2.2.1 Geomorfología

El área de estudio se localiza en los límites de las provincias de la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental (Raisz, 1964) (figura 2). Forma parte de una planicie alargada con orientación norte-sur, que está limitada hacia el oeste por la falla de San Miguel Allende; al este por la falla de San Luis de La paz y el bloque levantado que corresponde a la Meseta del Pueblo y al sureste la Sierra de Pozos. Las elevaciones de la planicie van de 2018 a 2020 m.s.n.m. con lomeríos de 2050 a 2060 m.s.n.m.

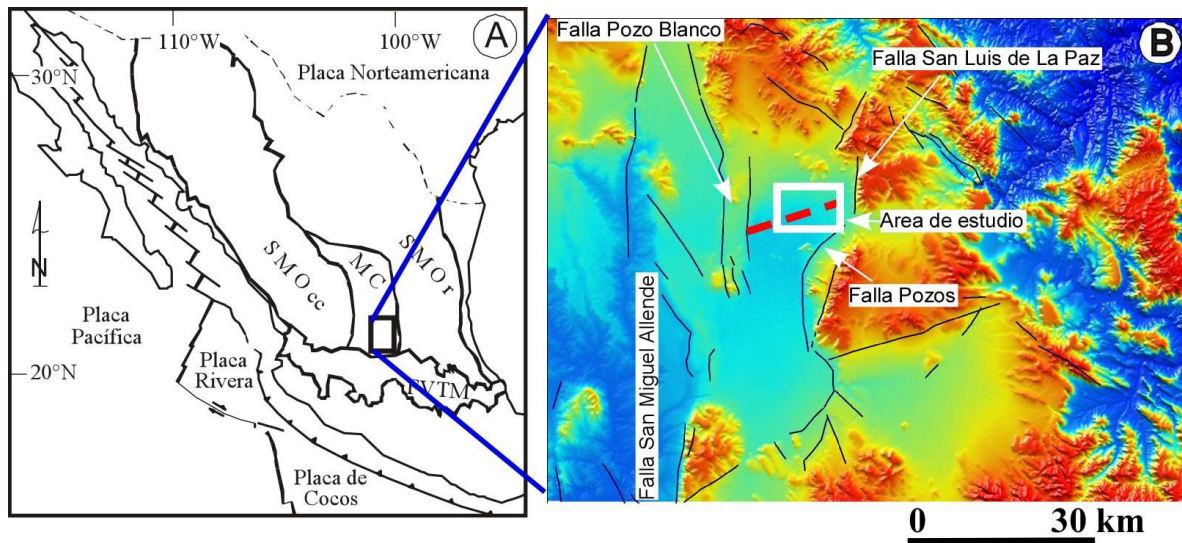


Figura 2. Provincias fisiográficas donde se ubica el área de estudio. Sierra Madre Occidental (SMO cc), Mesa Central (MC), Sierra Madre Oriental (SMOR). B) Modelo Digital de Elevaciones de la parte SE de la Mesa Central, indicando los principales sistemas de fallas (Líneas negras).

### 2.2.2 Estratigrafía

La geología del área de estudio fue tomada de la carta geológica F14-C35, escala 1:50 000 (SGM, 2008) (Figura 3). Al mismo tiempo la descripción de las unidades litológicas y estructurales se basa en (SGM, 2008) así como de los estudios previos de los alrededores de



San Luis de La paz (Alaniz-Ruiz, 2002; Alaniz-Alvarez, et al., 2002), así como de la información estructural de Alanís-Álvarez, et al. (2002).

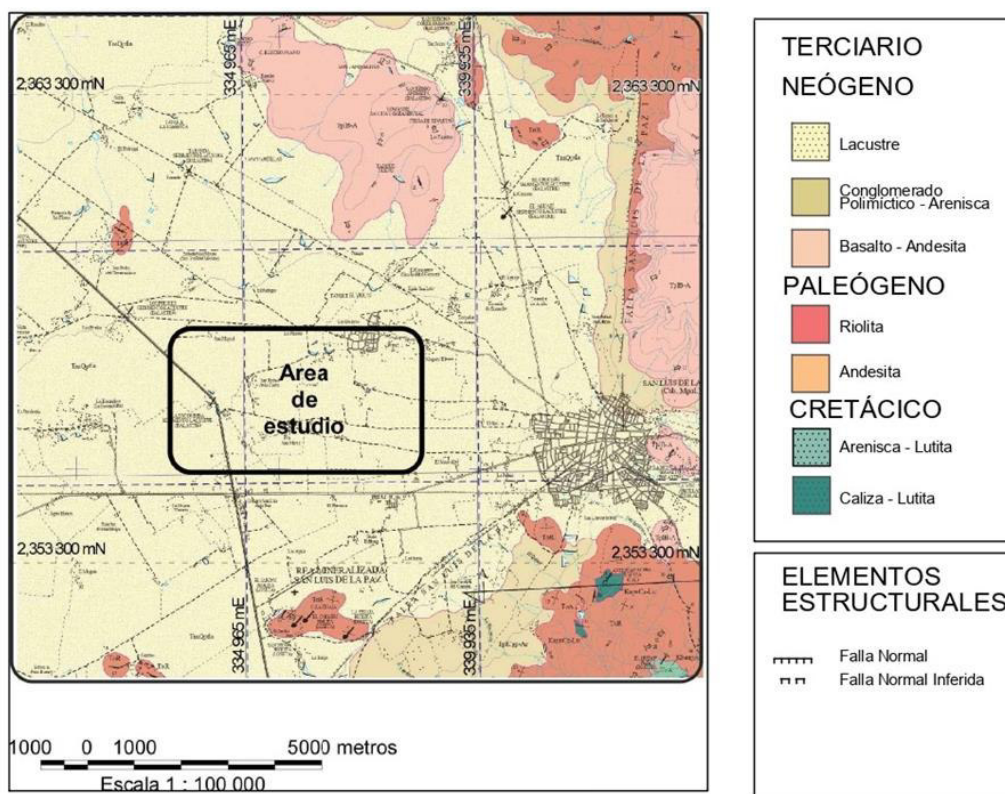


Figura 3. Geología del área de estudio. Modificada de la carta Geológica F14-C35 1:50 000, Servicio Geológico Mexicano, 2008.

### 2.2.2.1 Cretácico Inferior

Las rocas del Cretácico Inferior afloran al sur de San Luis de La Paz y en Mineral de Pozos. La unidad descrita como Arenisca- Lutita aflora únicamente en pequeños afloramientos en el sureste de la zona de estudio (Figura 3), en ella se encuentran cuarzos redondeados en una matriz de limo con cementante calcáreo, presenta estratificación delgada y un color pardo aun estando intemperizada; está alternada con lutita de color verde olivo que presenta estratificación muy delgada Ortega-Flores et al. (2014), denomina a esta unidad como Arenisca Mineral de Pozos, ubicándola en el Cenomaniano, por medio de edades U-Pb en zircones detríticos. Por otra parte, se encuentra sobreyacida en contacto discordante con la riolita Oligoceno, y se le calcula un espesor de 350 metros aproximadamente (Figura 4), formando lomeríos con pendientes suaves cubiertos en su mayoría por regolito.

La unidad descrita como Caliza- Lutita (SGM,2008) presenta un color gris claro en superficie fresca y estando intemperizada se observa de color amarillento, tiene estratificación delgada con texturas mudstone y wackestone. Fué descrita por Ortega-Flores, et al. (2014), como Caliza La Luz, ubicándola en el Aptiano-Albiano y correlacionable con la Formación el Doctor o Tamaulipas de la Sierra Madre Oriental.

El contacto superior es discordante a la Riolita Oligoceno y se calcula un espesor mayor a 150 metros aproximadamente, aunque no se puede observar en superficie (Figura 4).

#### 2.2.2.2 Terciario Paleógeno

El Paleógeno está representado por andesitas y riolitas del Oligoceno. Las andesitas afloran al sureste de la zona de estudio (Figura 3), se presenta de color gris con tonalidades verdes y café muy claro cuando está intemperizada, con textura microcristalina con pequeños cristales de plagioclasa y cloritización en una matriz afanítica y con flujo laminar. Los afloramientos forman lomeríos con pendientes suaves.

Es de origen volcánico extrusivo, con contacto inferior discordante a la Arenisca-Lutita, subyace a la toba riolítica y se estima un espesor mayor a 150 metros (Figura 4) (SGM, 2008).

La riolita se presenta como derrames de lava y se puede encontrar en forma de domos riolíticos o bien, con presencia de intercalaciones de tobas e ignimbritas riolíticas en cuyas cubiertas es muy común la presencia de vitrófido (Figura 4). En general presenta abundantes cristales de micas, cuarzo y feldspatos, en la mayoría de los casos se presenta con una textura en bandas de flujo y generalmente presenta un bajo grado de oxidación e incluso muy poca alteración argílica (Aceves, 2020).

Está presente en abundancia en el sur cerca del cruce San Luis de la Paz y noreste donde se proyecta la Falla San Luis de la Paz de la zona de estudio, así como en una menor proporción en la parte noroeste (Figura 3).

El espesor de toda la unidad se aproxima a los 350 metros; su contacto inferior es discordante a la Andesita y a su vez está cubierta por depósitos continentales de conglomerado polimictico y arenisca. A esta unidad se le infiere un origen ígneo subvolcánico y que está relacionado con el emplazamiento de domos.

#### 2.2.2.3 Terciario Neógeno

El Neógeno está representado por rocas volcánicas basálticas, andesíticas y sedimentarias clásticas. Las rocas de basalto y andesita presentes en la zona se encuentran en su mayoría en la parte norte coronando lomeríos y elevaciones al E y NE de San Luis de La Paz (Figura 3). Presenta, tonalidades entre gris claro en superficie fresca y con intemperismo presenta color café claro; su textura es merocristalina con variación a afanítica, con cristales de plagioclasa y en pequeña proporción cristales de olivino emplazados en matriz afanítica, puede presentar estructura vesicular y algunas de estas rellenas de zeolitas. A los basaltos se le intercalan cuerpos andesíticos de color gris oscuro con puntos verdosos y color café muy claro estando intemperizada; la andesita presenta también una textura merocristalina con estructura fluidal en algunas partes laminar y pequeños cristales de plagioclasa con cloritización. La unidad Basalto-Andesita sobreyace de forma discordante a la riolita al norte de San Luis de la Paz; se infiere un espesor de 150 metros aproximadamente (Figura 4) (SGM,2008).

El conglomerado polimíctico-arenisca aflora en la zona este del área de estudio (Figura 3) y se presenta como un depósito caótico que forma lomeríos suaves. La Arenisca se presenta en casi la totalidad del afloramiento en colores rojizos tanto intemperizada como en superficie fresca, una textura de grano medio subredondeado de plagioclasa y cuarzo, se observa con estratificación poco desarrollada de aproximadamente 50 centímetros de espesor; Se pueden observar lentes de conglomerado con clastos de riolita y basalto (Figura 4). Esta unidad cubre en forma discordante a la riolita junto con el basalto con un espesor menor a 20 metros, y se interpreta que son de origen fluvial (SGM, 2008).

Finalmente se encuentra el material de relleno correspondiente al lacustre, rellenando el Graben de San Luis de La Paz que es parte del área de estudio.

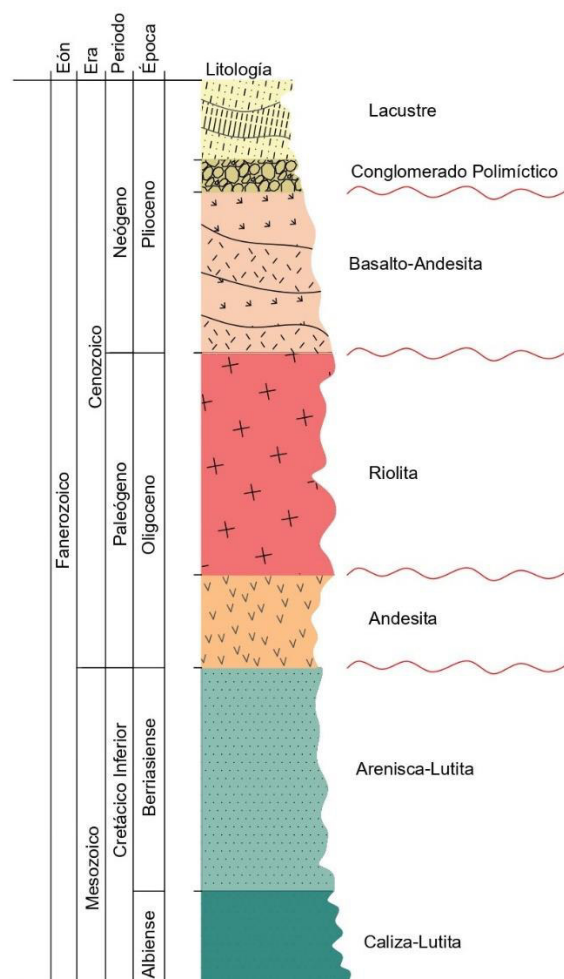


Figura 4. Columna estratigráfica (modificada de SGM, 2008 y Aceves 2020).

### 2.3 Geología Local

El área de estudio se localiza en el graben de San Luis de La Paz, que se encuentra 6 km al este del Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA). El SFTSMA corresponde a un sistema de fallas tipo normal de rumbo NNW-SSE con más de 500 km de longitud y 35 km

de ancho que se extiende desde Taxco, Guerrero, hasta el Norte de la Sierra de Catorce (Alanís Álvarez, et al., 2002). La zona seleccionada donde se aplicaron los métodos geofísicos se localiza en el límite sureste del sistema San Luis de La Paz-Salinas Hidalgo (SLP-SH) (Alaniz-Álvarez, et al., 2002).

La zona estudiada es un terreno plano, donde solo se observa suelo y superficies de cultivo, los suelos corresponden a vertisol-pelvico con textura fina, desarrollados en una superficie plana a ligeramente ondulosa. Hacia el extremo este del área estudiada, en las proximidades de San Luis de La Paz, el suelo va cambiando a castañozem luvico.

Con relación al relleno sedimentario, no existen afloramientos o canteras de materiales que nos permitieran visualizar directamente el tipo de relleno, sin embargo, de acuerdo con la descripción de la carta geológica 1:50 000, el relleno sedimentario del graben de San Luis de La Paz está conformado por conglomerados y arenas fluviales inter digitados con sedimentos limo-arcillosos considerados de ambiente lacustre del Terciario Neógeno (SGM, 2008).

#### 2.4 Graben de San Luis de La Paz.

El Graben de San Luis de La Paz está limitado al oeste por la Falla Pozo Blanco y al este por la Falla San Luis de La Paz (SGM, 2008) (Figura 3). La Falla Pozo Blanco tiene una orientación N-S con el bloque hundido al E. La Falla San Luis de La Paz es una falla normal con el bloque hundido al W, que presenta una zona de escarpe al norte de San Luis de la Paz. Su porción norte tiene rumbo N 05° E, cruza desde la estación San Javier hasta San Luis de la Paz, con una longitud aproximada de 11 kilómetros. A partir de esta población, se flexiona al SW con un rumbo aproximado de N 50° E por una distancia aproximada de 7 kilómetros.

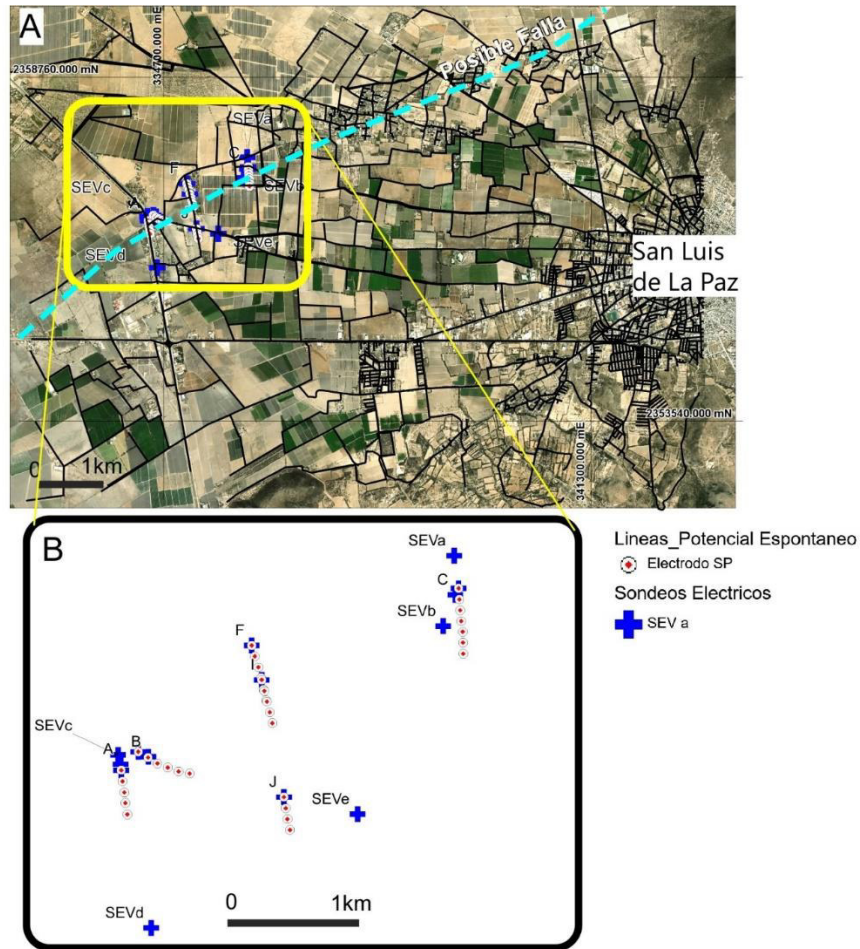


Figura 5. Área de estudio y localización de Sondeos Eléctricos Verticales y de Potencial Natural. La línea azul discontinua corresponde al trazo de la falla hipotética estudiada.

## Capítulo 3 – Marco teórico

### 3.1 Teoría de la Prospección Geoeléctrica.

El principio de este método es básicamente identificar material geológico en el subsuelo o acuíferos ocultos gracias a aparatos eléctricos que miden las variaciones de la resistividad del subsuelo al pasar la corriente eléctrica. Son muy usados ya que son asertivos y son métodos relativamente económicos.

Este método se divide en dos tipos, las corrientes artificiales y las corrientes naturales. En las artificiales se tiene que implementar equipos que inyecten corriente al subsuelo la cual se inyecta desde un primer punto, viaja a través del material y se registra en el punto dos. En el caso de las corrientes naturales no es necesario inyectar corriente eléctrica al subsuelo pues se mide la corriente natural de este, la cual se basa en el principio de óxido-reducción (Zavala Reymer, 2021).



A su vez cada una de las categorías ya mencionadas se subdivide en dos más, las corrientes alternas y las continuas. En las alternas el flujo de electrones puede cambiar a través de los días o incluso de las horas, esto por diversos factores como, las corrientes telúricas o el flujo del agua, por mencionar algunos; en las corrientes continuas el flujo de electrones se mantiene constante (Zavala Reymer, 2021).

### 3.2 Potencial espontaneo.

También conocido como Potencial Natural (SP) es el potencial eléctrico natural de la tierra resultante de interacciones geológicas, geoquímicas e hidrológicas que hacen que existan potenciales eléctricos en la tierra en las proximidades del punto de medición (Charles, et al. 1983).

Se ha usado en la búsqueda de minerales, aunque se ha publicado poco con relación a interpretación cualitativa y en cuantitativa. Sin embargo, desde principios del Siglo XX, se ha usado en exploración para agua por Conrado Schlumberger y otros (Roberts, 2000).

Una ventaja de las medidas de SP para la investigación de problemas en el subsuelo es su simplicidad para obtenerlas. El equipo empleado es también muy sencillo, y consta de un par de electrodos no polarizables, un multímetro de alta impedancia y cables. Comúnmente se usa una solución saturada de sulfato de cobre para rellenar los electrodos (Alatorre et al., 2008).

La desventaja más significativa es que el propio proceso de adquisición de datos lleva asociado "errores" (polarización, deriva y efecto contacto suelo), que, si bien pueden ser mínimos para cada medida puntual, a la hora de sumar los gradientes a fin de obtener el potencial total, la magnitud de estos errores puede magnificarse significativamente (Revollo, 2015).

El equipo usado en superficie para este estudio es sencillo, económico y portátil. Algunos de los efectos que producen corrientes eléctricas naturales se deben al movimiento de agua en sí, y al roce con las paredes de cualquier conductor (Randall Roberts, et al., 1984).

#### **Potencial Electrocinético**

Es el potencial generado por un gradiente eléctrico a lo largo de la trayectoria del flujo, que a su vez es generado por el paso de una solución con cualidades de resistividad ( $\rho$ ) y viscosidad ( $\eta$ ) a través de un medio poroso (Revollo, 2015).

### 3.2 Resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica ( $\rho$ ), medida en Ohms es un parámetro muy importante en la prospección geoelectrica ya que gracias a esta se determina el material que está presente en el área de estudio debido a que describe la dificultad de la corriente al pasar por los diferentes materiales presentes en el subsuelo (Figura 6).

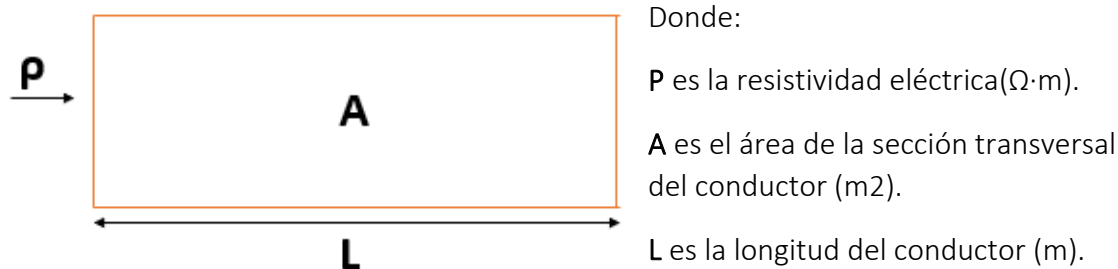


Figura 6. Esquema representativo de la resistividad (modificado de Estrada et al., 2013).

Como se muestra en la figura 6, suponiendo que el conductor tiene ya una resistencia ( $R$ ) establecida en Ohms ( $\Omega$ ) y tomando en cuenta que se conoce previamente la longitud del conductor y por ende el área, se puede determinar mediante la ecuación 1 su resistividad ( $\rho$ ), la cual se mide con unidades ( $\Omega \cdot m$ ).

$$\rho = R \frac{L}{A}$$

Ecuación (1)

### 3.3 Ecuaciones gobernantes del método de prospección Geoeléctrica.

La ley fundamental en que se basa toda la geoeléctrica es la Ley de Ohm, mediante la cual se relaciona el Potencial Eléctrico ( $V$ ) (Tensión o Voltaje) con la Intensidad de Corriente ( $I$ ) y la Resistencia ( $R$ ) del medio por el cual circula la corriente (Ecuación 2) (Estrada, 2013).

$$V = IR$$

Ecuación (2)

Considerando un suelo homogéneo su flujo se mantendrá constante y en una misma dirección, así que para determinar la distribución de corriente se tomará en cuenta que el radio ( $r$ ), obteniendo la ecuación 3:

$$\frac{4\pi r^2}{2} = 2\pi r^2$$

Ecuación (3)

Tomando en cuenta que  $L$  es la longitud entre un electrodo y cualquier punto en la corriente, y  $r$  la amplitud o profundidad de la corriente, se puede interpretar que  $L = r$ .

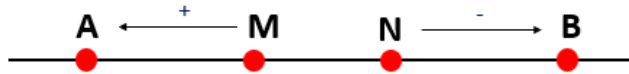


Figura 7. Esquema del arreglo de los electrodos A y B con relación a M y N.

En este trabajo fueron considerados dos electrodos inyectantes (A y B) y dos electrodos para las lecturas (M y N) como se muestra en la figura 7, por lo que la ecuación sería la siguiente:

$$\rho = \frac{2\pi}{\left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]} \frac{\Delta V}{I}$$

Ecuación (4)

Los valores de diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) (Ecuación 4) son tomados con el voltímetro y los valores de intensidad de corriente (I) con un Amperímetro, además que se conocen las distancias del punto inicial al electrodo A, y al electrodo B, al igual que las distancias del punto inicial a M y a N, entonces se puede determinar la resistividad ( $\rho$ ) (Estrada, 2013).

### 3.4 Resistividad Aparente.

La resistividad aparente ( $\rho_a$ ) (Ecuación 5) es la combinación de la diferencia de la intensidad de corriente y de la geometría de los electrodos, estos factores nos conducen a determinar la oposición del flujo de corriente eléctrica a través del subsuelo, dependiendo de sus características físicas y químicas (Estrada, 2013).

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

Ecuación (5)

k es la constante electródica y depende de la geometría del dispositivo.

### 3.5 Sondeos eléctricos verticales.

Consisten en determinar la variación de la resistividad con la profundidad en un punto O ubicado en el centro de AB (Figura 8). Esto se logra ampliando la separación de los electrodos de corriente AB hasta seis veces desde dicho centro, de modo que la corriente penetre cada vez a mayor profundidad. Los sucesivos valores de resistividad ( $\rho$ ) determinados corresponden a distintas profundidades, siempre bajo el punto central. Esto se realiza manteniendo fijos los de potencial MN, pero cuando la tensión en el voltímetro es muy pequeña por la distancia a los electrodos de corriente, se expanden los MN y se realizan dos mediciones con las dos últimas posiciones de los AB, para asegurar el ensamble de todos los tramos (Estrada, 2013).

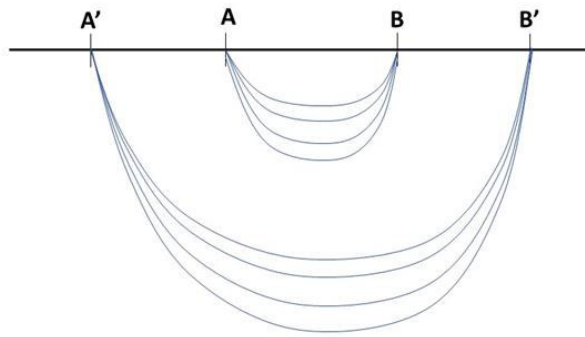


Figura 8. Esquema representativo de las variantes de resistividad medidas en el Sondeo Eléctrico Vertical.

### 3.5.1 Dispositivo Schlumberger

Este dispositivo se basa en el arreglo de los electrodos de tal forma en que la distancia entre M y N tienda a encontrarse en el punto cero para medir el campo eléctrico en el subsuelo, dicha corriente es inyectada por A y B. Básicamente se colocan los electrodos M y N a una misma distancia uno de otro y después A y B donde la distancia entre ambos se divide entre 2 y queden a la misma distancia del punto cero que fue marcado inicialmente. Durante todo el proceso solo se moverán dos electrodos previamente determinados, los electrodos M y N solo pueden tener de separación hasta 4 metros, mientras que los electrodos A y B la pueden tener hasta 20 metros.

N	AB/2	MN	SP	V	I	K	Ro. a
1	1	0.5	-	-	-	-	0
2	2	0.5	-	-	-	-	0
3	3	0.5	-	-	-	-	0
4	4	0.5	-	-	-	-	0
5	4	1	-	-	-	-	0
6	5	1	-	-	-	-	0
7	6	1	-	-	-	-	0
8	8	1	-	-	-	-	0
9	10	1	-	-	-	-	0
10	10	2.5	-	-	-	-	0
11	15	2.5	-	-	-	-	0
12	20	2.5	-	-	-	-	0
13	25	2.5	-	-	-	-	0
14	30	2.5	-	-	-	-	0
15	35	2.5	-	-	-	-	0
16	40	2.5	-	-	-	-	0
17	40	10	-	-	-	-	0
18	50	10	-	-	-	-	0
19	60	10	-	-	-	-	0
20	70	10	-	-	-	-	0
21	80	10	-	-	-	-	0
22	100	10	-	-	-	-	0
23	0	0	-	-	-	-	0
24	0	0	-	-	-	-	0

Figura 9. Ejemplo de un registro de separación entre electrodos por el Dispositivo Schlumberger.

La fórmula para determinar el Factor Geométrico para este sistema será la siguiente:

$$k = \pi \frac{B (B + A)}{A}$$

Ecuación (7)

### 3.6 Factor Geométrico

El Factor Geométrico  $k$  es la relación entre las distancias que los electrodos tienen con el punto base, y este varía dependiendo del arreglo que se dé a cada uno. En este trabajo se usó el arreglo Schlumberger así que las distancias eran las mismas entre los electrodos AB y MN con el punto base.

Este factor se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$$

Ecuación (8)

### 3.7 Empalme.

Al momento de separar los electrodos, los NM se mantienen en la misma posición hasta un determinado tiempo en el cual, se abrirán más uno respecto al otro, y para ese momento los electrodos A y B se mantendrán en la última posición en la que fueron colocados, y se tomará la medida, posterior a eso se seguirán moviendo los electrodos A y B, hasta que sea momento de separar más N y M.

La separación es importante ya que mientras se mantenga más constante la separación de los electrodos N y M, menor será el margen de error.

El empalme es para comprobar si las mediciones se van haciendo correctamente y así continuar con las lecturas.

### 3.8 Ventajas y desventajas del arreglo Schlumberger.

Ventajas:

- Las curvas teóricas correspondientes al dispositivo Schlumberger son más expresivas y sensibles a las características del corte geoelectrico sobre el que se efectúan, que las obtenidas con otros arreglos. Permite eliminar los golpes de medida siendo la distancia entre M y N pequeña. Se llama golpe de medida al brusco aumento de resistividad aparente, causada por la presencia fortuita de una pequeña masa conductora, próxima a uno de los electrodos.
- A medida que la separación entre los electrodos AB aumenta con respecto al centro de simetría, situado en el eje del sondeo, las líneas de corriente pueden alcanzar profundidades mayores, proporcionales a la separación (Figuras 7 y 8).

Desventajas:

- Deben realizarse ciertas correcciones en la curva de resistividad aparente ( $\rho_a$ ) obtenida en el campo cuando se realice algún empalme para obtener de esta manera una sola curva.

## Capítulo 4 – Metodología

### 4.1 Potencial Natural

#### 4.1.1 Instrumentación Geofísica

El instrumento usado para el método Potencial Natural (PN) o Potencial Espontáneo se elaboró previo a las salidas a campo usando materiales fáciles de encontrar, tales como tubos de pvc de aproximadamente 15 cm y 4 cm de diámetro, tapones de madera de aproximadamente 4 cm (Figuras 11 y 12), tubo de cobre, sulfato de cobre (Figura 10), agua destilada, ligas de plástico y cinta.



Figura 10. CuSO<sub>4</sub> y Agua destilada.



Figura 11. Tubo de cobre previamente introducida en el trozo de madera.



Figura 12. Tapones de madera ya saturados de sulfato de cobre.



Figura 13. Electrodo terminado antes de sellarlo con la cinta.

Para elaborar el electrodo (no polarizable) se realiza un orificio en alguno de los 2 tapones de madera de 4 cm que se utilizarán en el electrodo como el que se puede observar en la figura 11, donde posteriormente se colocará un tubo de cobre y se procederá a ajustar con las ligas de plástico (para que en el futuro no se derrame la solución de sulfato de cobre).

Inicialmente para saturar los tapones de madera con  $\text{CuSO}_4$ , se ponen a hervir con el sulfato de cobre y se deja reposar, estos tomarán un color azul como en la figura 12; posteriormente se pega el tapón de madera en uno de los extremos del tubo de pvc con pegamento para pvc, se rellena  $\frac{3}{4}$  del tubo con la solución saturada de  $\text{CuSO}_4$  y se tapa con el otro tapón de madera que está con el tubo de cobre y posteriormente se sella con cinta.

La solución saturada de  $\text{CuSO}_4$  se prepara al disolver el Sulfato de cobre en el agua destilada hasta que esta quede saturada de  $\text{CuSO}_4$ , como se muestra en la figura 10.

#### 4.1.2 Adquisición de datos de campo

Para recolectar las lecturas en campo se utilizó un multímetro digital, cables de punta de prueba para multímetro, cables de corriente, picas, metro o algún artefacto de medida, cuaderno de campo para anotar las lecturas del multímetro, todo esto complementando los electrodos (no polarizables) previamente construidos (Figura 14).



Figura 14. Estación base desde la cual se toman las lecturas.

Para las lecturas se probaron dos métodos, uno donde el electrodo base no se mueve durante todo el proceso y el otro donde este también va cambiando de posición (método de gradiente).

En el primer método se elige la zona de estudio y el primer punto (estación base) donde se miden las coordenadas y la orientación de la línea de sección. En nuestro estudio se buscó realizar la línea de sección perpendicular a la falla geológica hipotética estudiada. Posteriormente se hace un hoyo en el suelo (se deben retirar todas las rocas ya que pueden afectar la lectura), se coloca el electrodo base que es el negativo y se rellena con tierra lo que resta del hoyo. Se procede a medir 20 metros, donde se enterrará el segundo electrodo que será el electrodo caminante que es el positivo.

Se conectan ambos lados al multímetro y desde la base se toma la lectura en milivoltios (mV) y Kilohmio ( $\text{K}\Omega$ ), para registrar en la tabla previamente hecha en el cuaderno de campo. Para

tener mayor certeza se invierten los cables, es decir, el cable positivo que correspondía al electrodo caminante ahora se conectará al electrodo base y el cable negativo ahora está en el electrodo caminante, lo ideal es que al cambiarlos la lectura sea casi igual, pero con cambio de signos, si ese es el caso se procede a seguir con las lecturas.

El electrodo caminante se moverá 20 metros más y se tomará la lectura, siguiendo los datos previamente descritos, y así será sucesivamente cada 20 metros hasta tener lectura de 140 metros sin que el electrodo base se mueva, tomando la lectura desde la estación base (Figura 15).

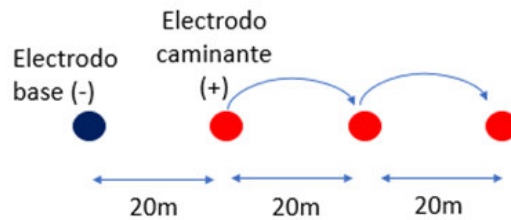


Figura 15. Diagrama del método para el electrodo base.

Para guardar los resultados se deben ir anotando consecutivamente en la libreta de campo, en una tabla donde en la primer columna se debe enumerar y en la segunda se pondrá la distancia, en este caso, de 0 m a 20 m, de 20 m a 40 m dependiendo de la distancia que se esté dando en campo; en las siguientes dos columnas se anotarán los resultados en Kiloohmios y milivoltios, consecutivo a eso se anotarán los resultados invertidos (kiloohmios y milivoltios) (Figura 16) y finalmente las coordenadas UTM que tomaran la posición del electrodo base en esa lectura.

SELF POTENTIAL-SURVEY						/ /	
ÁREA:				LÍNEA:			
ELEVACIÓN:				HORA INICIO:			
ORIENTACIÓN:				HORA TERMINO:			
				INVERTIDO		COORDENADAS	
LÍNEA	DISTANCIA (m)	K Ω	mV	K Ω	mV	X	Y

Figura 16. Formato de registro de los resultados de campo para el primer método.

El método de gradiente se realiza ubicando el electrodo base, tomando las coordenadas de este y su orientación; de la misma forma se realiza un hoyo donde será colocado el electrodo base y 20 metros después se colocará el electrodo caminante también en un hoyo. Se toman las lecturas de la misma manera que en el primer método.

Al tomar las primeras lecturas (normal e invertidas) se desplaza el electrodo base al lugar donde se encuentra el electrodo caminante y el electrodo caminante se desplaza 20 metros



delante de la base, procediendo a tomar las lecturas (Figura 17). Esto se repetirá de la misma manera hasta tener las lecturas de 140 metros de sección.

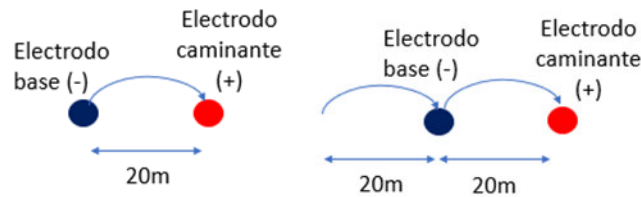


Figura 17. Diagrama del método gradiente.

En este método el formato para registrar los datos de campo es el mismo que en el primer método, con la diferencia que las distancias se moverán como lo indica el método, esto quiere decir que comenzará de 0m a 20m y después de 20m a 40m y así sucesivamente, guiándonos por la separación que le estemos dando.

## 4.2 SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL (SEV)

### 4.2.1 Instrumentación geofísica

Para este tipo de prueba se utilizó un resistivímetro marca SARIS (100W, 500V y 1.0 Amperes) el cual permite inyectar corriente y leer los datos, dependiendo del arreglo usado, como complementos se necesitan al menos cuatro electrodos que son varillas de cobre de una longitud de 30 a 50 cm aproximadamente, botellas rellenas de agua con sal, martillos, y cables de corriente (cuatro cables diferentes).

### 4.2.2 Adquisición de datos de campo

Para la adquisición de datos con el sondeo eléctrico vertical se usó el arreglo Schlumberguer ya que es el mejor arreglo en cuando a los sondeos eléctricos verticales, como se proseguirá explicando a continuación, este arreglo básicamente consiste en poner los electrodos inyectantes a una cierta separación del punto cero y conforme los electrodos lectores se muevan de sitio también se moverán los electrodos inyectantes, esto para que las lecturas sean más precisas.

Como primer paso y muy importante se debe escoger un lugar donde el equipo de medición este seguro (Figura 18), una vez que esté ubicado se comenzará a colocar los primeros dos electrodos que son los encargados de leer el resultado (M y N), la distancia entre ellos puede variar dependiendo de las necesidades, en este trabajo se comenzó por darle una separación de 0.5 o 1 metro entre ambos, antes de ser colocados se agrega un poco de agua con sal y con el martillo se clavan las varillas y se les coloca su respectivo cable el cual debe traer pinzas de ambos lados, ya que una se conecta al electrodo y el otro extremo al equipo de medición; una vez colocados los primeros electrodos se colocan los siguientes dos electrodos que son los que inyectan la corriente (A,B) de igual forma la separación puede variar inicialmente ampliando la separación paulatinamente en cada lectura (Figura 19).



Figura 18. Colocación del equipo y los instrumentos necesarios.

Ya colocados correctamente los electrodos y los cables se debe configurar el equipo, donde se editarán las distancias entre electrodos siempre que se mueva alguno, al hacer eso hay un botón para inyectar la corriente y una vez inyectada se realiza la lectura, cada que se cambie alguno de lugar se tiene que realizar el mismo procedimiento, el equipo de medición por sí solo arroja los resultados.

La figura 19 muestra la representación gráfica de lo que sucede al interior al inyectar la corriente.

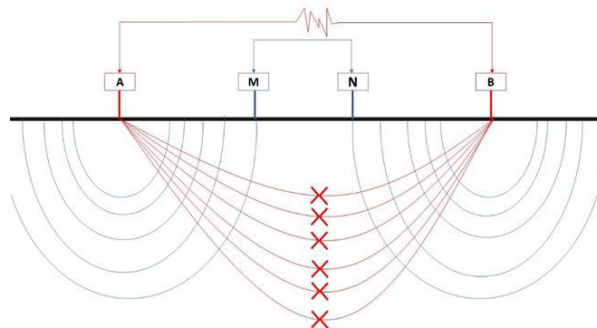


Figura 19. Diagrama Sondeo Eléctrico Vertical, con arreglo Schlumberger. Líneas de corriente (rojo), líneas de potencias (azul).

#### 4.2.3 Procesamiento de datos geofísicos SEV (Software).

Existen diversos Software para el procesamiento e interpretación de los SEV, nosotros usamos, el IPI2Win el cual es un software de acceso libre, fácil de instalar, además que ocupa poco espacio, dentro de este software básicamente introduces los datos arrojados por el equipo de medición, antes de comenzar se debe tomar en cuenta que el arreglo es en Schlumberger (ya que así se programó el equipo en campo), en la figura 20 se pueden observar los datos necesarios para que se pueda crear la curva de resistividad contra el espaciamiento de electrodos.

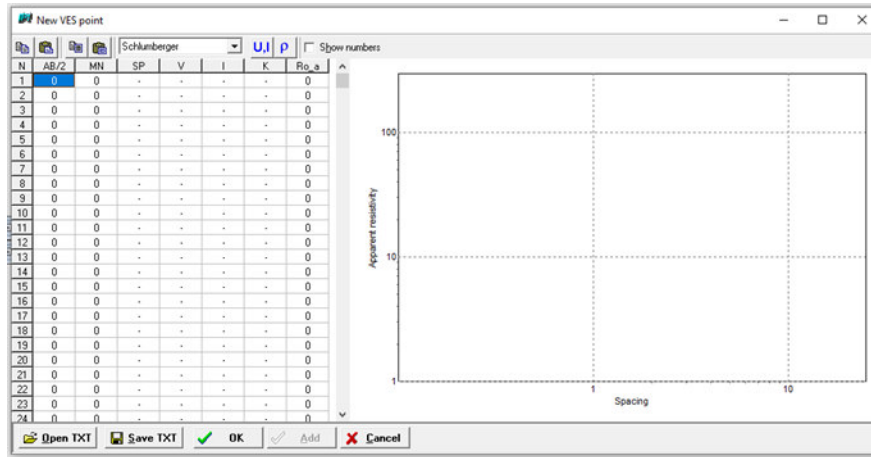


Figura 20. Datos requeridos en el software IPIwin.

En el orden en que se van registrando los datos obtenidos se comenzará a crear la gráfica como se muestra en la figura 21, con cada renglón completo se va añadiendo un punto.

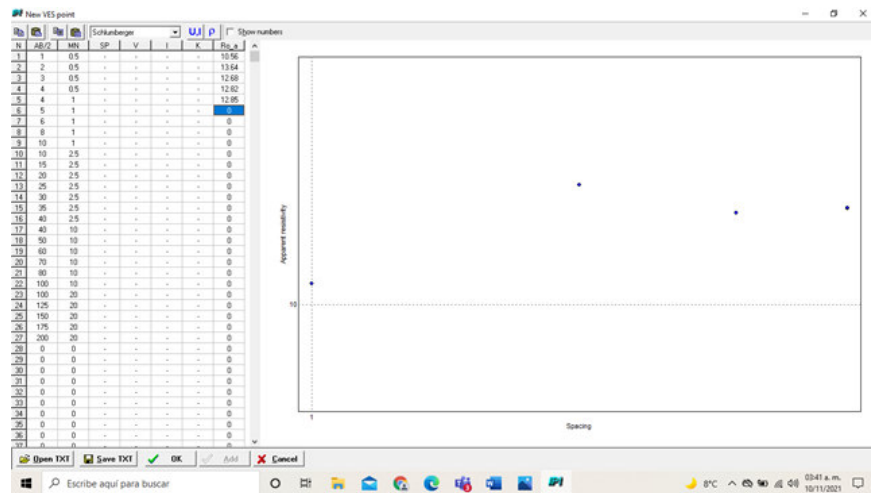


Figura 21. Gráfica de cada punto después de ingresar los datos al software IPIwin.

Una vez pasados todos los resultados quedará completa la tabla y lo que se busca es que la línea azul (curva teórica del modelado) quede lo más paralela a la línea roja (resultados) esto para tener el menor porcentaje de error posible y que la interpretación sea más acertada, tal como se muestra en la figura 22.

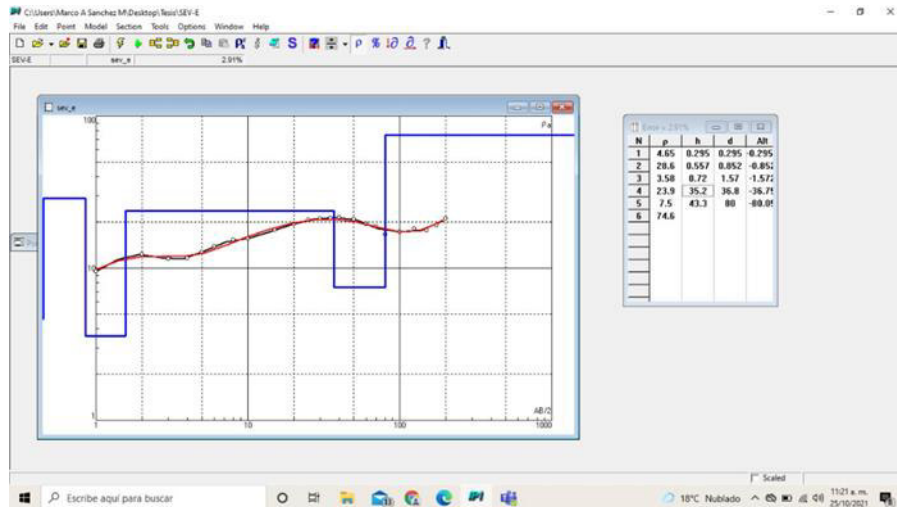


Figura 22. Resultado con 2.91% como margen de error.

## Capítulo 5 – Resultados

### 5.1 Secciones de Potencial Natural (PN).

Con los datos recolectados en campo por el método de Potencial Natural se construyeron gráficos de gradientes de PN perpendiculares a la falla, mostrados en la figura 23. Los gráficos de gradientes de PN determinan por medio de los cambios de potencial las anomalías geofísicas que en este trabajo se identificaron como fallas ocultas. La falla principal, que denominamos en el presente trabajo como “Falla Laguna Seca” está proyectada en todas las secciones con línea punteada.

En la sección D se identificaron otras anomalías geofísicas de potencial espontáneo que se interpretaron como dos fallas geológicas, la falla “Laguna Seca” con lecturas de  $-0.1\text{mV}$  que, al cambiar de valores positivos a uno negativo, y la segunda falla con  $-6.3\text{mV}$ , de igual forma cambiando de valores positivos a uno negativo y después positivo nuevamente.

La sección F-I fue la más larga, cubriendo hasta 500 metros de distancia (Figura 23), En esta sección fueron identificadas tres anomalías geofísicas de potencial natural que se interpretaron como tres fallas, la primera corresponde a la falla “Laguna Seca”, cuando se tomó una lectura de  $5.1\text{mV}$  siendo esta positiva y la siguiente teniendo un cambio abrupto a  $-4.9\text{mV}$ . Una segunda falla paralela a la principal, que de igual forma se proyectó en la sección D fue detectada al tener una lectura de  $5.2\text{mV}$  y la siguiente lectura con un cambio significativo a  $-1.8\text{mV}$ , separada 150 metros; finalmente la tercera falla fue detectada aproximadamente a 200 al sur de la falla “Laguna Seca” y solo fue identificada en esta sección ya que como se mencionó previamente esta es la más larga de todas, los cambios en las lecturas se presentaron de positivos al tener una lectura de  $1.8\text{mV}$ , para posteriormente presentar una lectura contrastante de  $-3.4\text{mV}$ .

En las secciones G y H (Figura 23) solo se detectó la anomalía geofísica de PN de la falla “Laguna Seca” que es la que está proyectada en todas las secciones ya que estas dos últimas fueron las más cortas. En la G la falla “Laguna Seca” se detectó a una distancia de inicio de 70 metros al tener un cambio de lecturas, la primera siendo de 1.8mV y teniendo un cambio considerable en la siguiente lectura de -9mV. La sección H presentó lecturas invertidas, comparadas con las otras secciones iniciando con lecturas negativas de -3.7mV y -4.3mV a un cambio drástico en la lectura a 3.2mV. Consideramos que este cambio de comportamiento se debió posiblemente a que en esta zona existía una zona de canal de riego y el suelo estaba saturado de agua, otra posible causa es la existencia de alto contenido en arcillas.

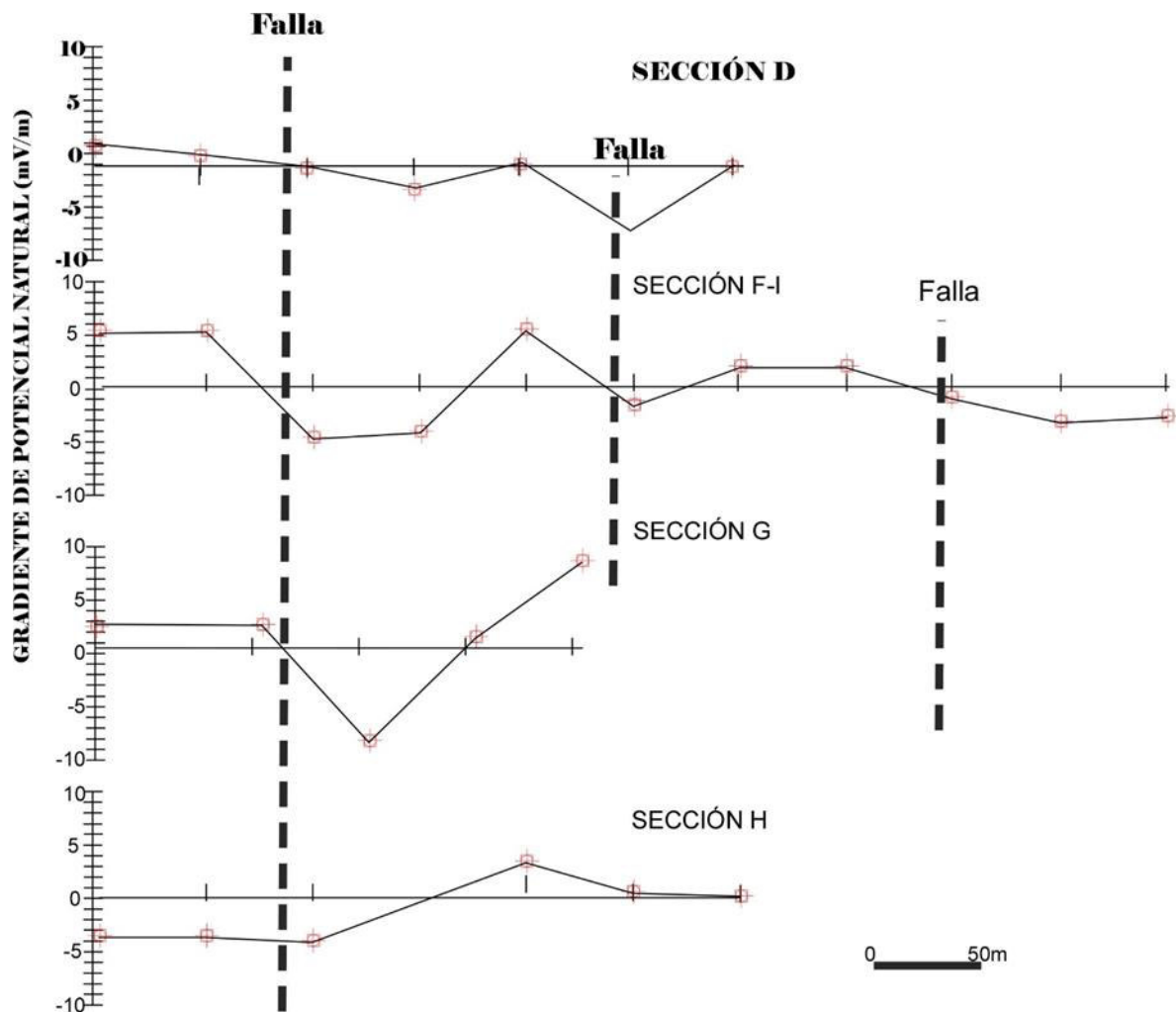


Figura 23. Gráficos de gradiente de Potencial Natural. Las líneas de sección se midieron perpendiculares a la falla explorada. La ubicación de las líneas se encuentra en la figura 5.

Para realizar la sección con el Potencial Natural se usó el método del electrodo base previamente descrito en la metodología (Figura 24), donde se va construyendo una sección

con lecturas de un electrodo fijo y el segundo electrodo móvil, que permite progresivamente mayor profundidad de investigación en la cual se registraron lecturas hasta los 45 metros (Figura 24). Como resultado se obtuvo la sección de potencial natural (Figura 24), que fue interpolada por medio de programa Surfer en la cual se toman los valores de separación entre electrodos con los valores en X, la profundidad como los valores en Y, y cada lectura es tomada como un valor del eje Z, como se puede observar en la figura 23. La sección de PN se midió a lo largo de la línea de sección D (Figura 5 localización y Figura 24 gráficos de gradiente) se logró identificar 2 anomalías geofísicas de potencial natural que se interpretaron como dos fallas geológicas ocultas que también fueron detectadas en las secciones anteriores. Como se muestra en la figura 24 en la sección los colores verdes representan mayor actividad electroquímica y se considera que la zona tiene alta permeabilidad, mientras cambia a azul y posteriormente a rojo indica que va disminuyendo esa actividad electroquímica, por esta razón se comprueba la posición de las fallas detectadas, ya que hay un cambio abrupto en las lecturas, cambiando de valores positivos a negativos.

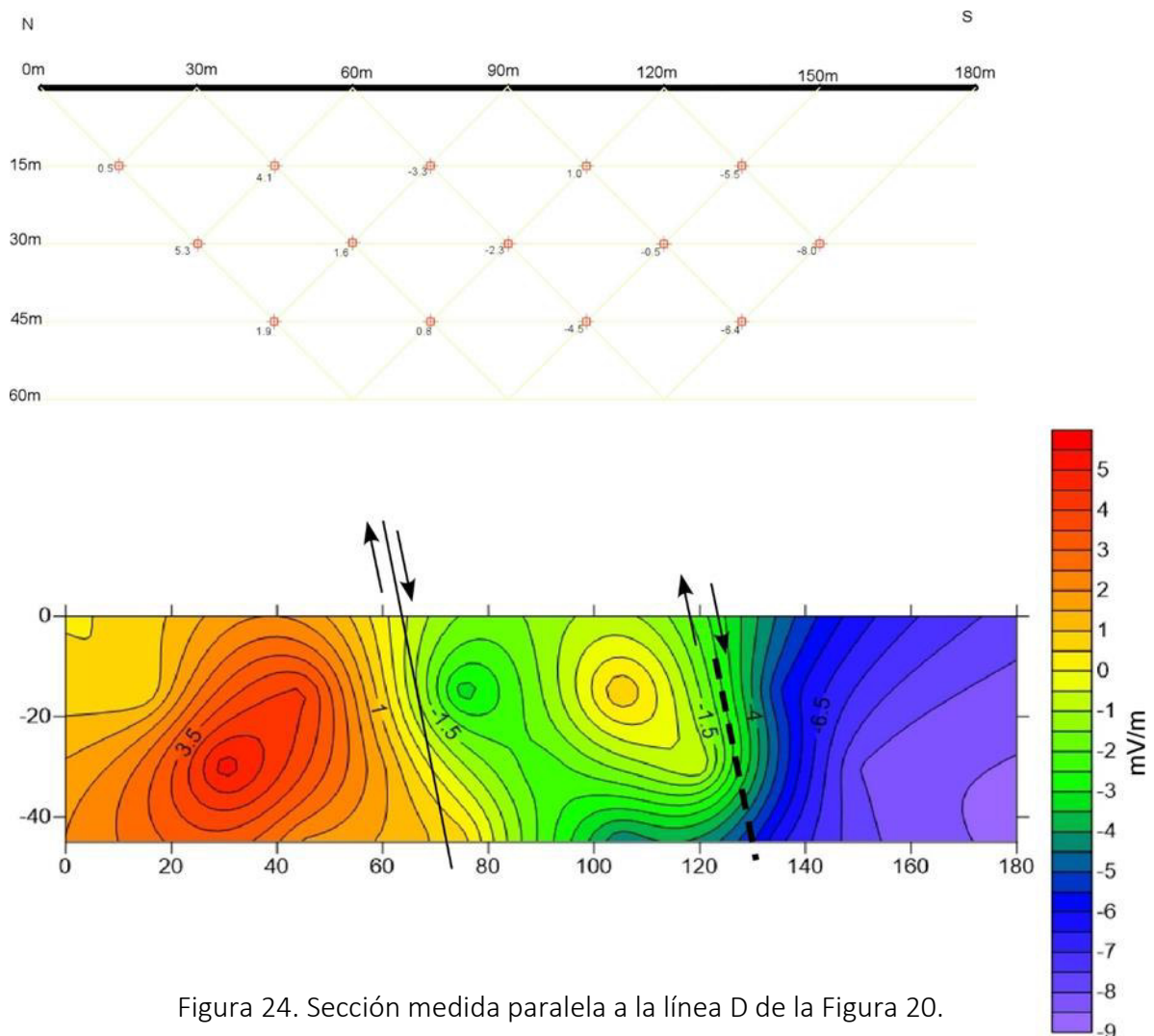


Figura 24. Sección medida paralela a la línea D de la Figura 20.



Finalmente se obtuvo una carta de isopotencial donde se proyectó la falla “Laguna Seca” y las posibles fallas paralelas, como se observa en la Figura 25. En la carta de isopotencial se proyectan las fallas en las zonas con alta permeabilidad, es decir con mayor actividad electroquímica en la zona, que es lo que indica el color azul y en las zonas de color rojo no se manifestó dicha actividad.

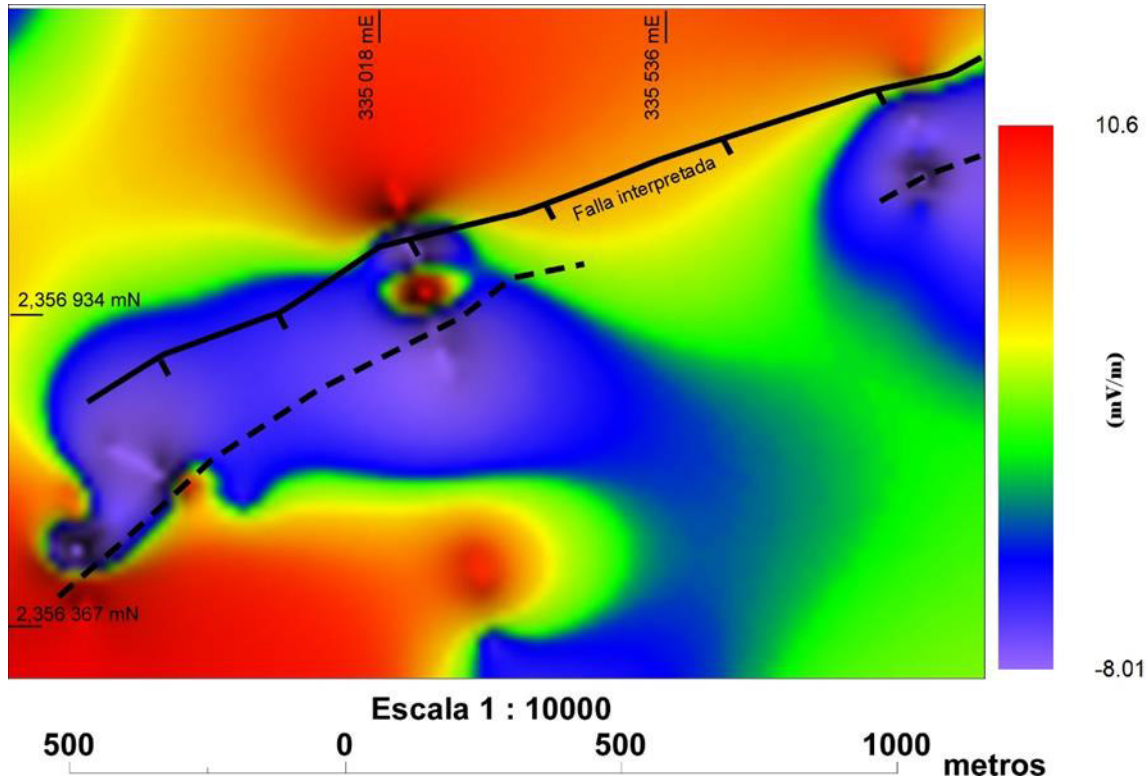


Figura 25. Carta de Isopotencial obtenidos por el método del Potencial Natural.

## 5.2 Sondeos eléctricos Verticales (SEV) medidos.

Los sondeos eléctricos verticales (SEV) medidos se interpretaron con el software IPIwin tomando en cuenta los valores de resistividad aparente de materiales geológicos, estos valores fueron tomados del artículo de Ramos-Leal, et al., (2007) ya que las litologías presentes en ese trabajo realizado en el Graben Villa de Reyes son muy similares a las de nuestra área de estudio. Los SEV se construyeron y se representan en las figuras 26 y 27, las cuales se muestran en ese orden debido a la ubicación donde se tomaron las lecturas. En la columna SEV A en superficie se encontró limos y arenas con una resistividad de 7.1 ohm-m, 3 metros con 40.4 ohm-m una brecha volcánica, debajo de esta fueron encontradas arcillas primero con 4.45 ohm-m de 4.71 a 7.40 metros de profundidad y después con 7.08 ohm-m esto llegando a los 11.6 metros de profundidad, de los 11.6 a los 18.2 metros se identificó brecha volcánica con 38.8 ohm-m; después a los 18.2 metros se encontró roca volcánica con 471,2607 y 1897 ohm-m.

En la columna SEV B (Figura 26) se determinaron arcillas en profundidades de 0 a 2.5 metros con 4.5 ohm-m y de 5 a 10.6 metros con 6 ohm-m, entre la arcilla hay arena -conglomerado con 26 ohm-m, y debajo de la última capa de arcilla, es decir a los 10.6 metros también se encontró otra capa de arena-conglomerado con 24.7 ohm-m, en esta capa se infiere que pasa una falla, lo que origina un desplazamiento de bloque de alrededor de los 3 metros, como consecuencia que la roca volcánica se encuentre más abajo debido a dicho desplazamiento. La roca volcánica se encuentra después de los 22 metros con 1097 y 3313 ohm-m.

Entre las columnas SEV B y SEV E (Figura 26) se infiere que hay otra falla oculta a mayor profundidad que la primera, llegando a la brecha volcánica presente al final de la columna.

En un principio se determinaron limos y arenas, en dos diferentes bloques, el primero de 0 a 2.5 metros con 9 ohm-m y el segundo hasta los 5.3 metros con 15 ohm-m; debajo de estas hay un bloque de arena-conglomerado con un grosor de 17.8 metros y 28.4 ohm-m; los dos bloques que se encuentran por debajo corresponden a limos y arcillas y cada bloque presenta 13.2 y 10.8 ohm-m respectivamente llegando a una profundidad de 100 metros, a donde llegamos a la brecha volcánica donde se infiere que está afectando la falla. Se puede interpretar con estas 3 columnas que se presenta un graben tipo escalonado.



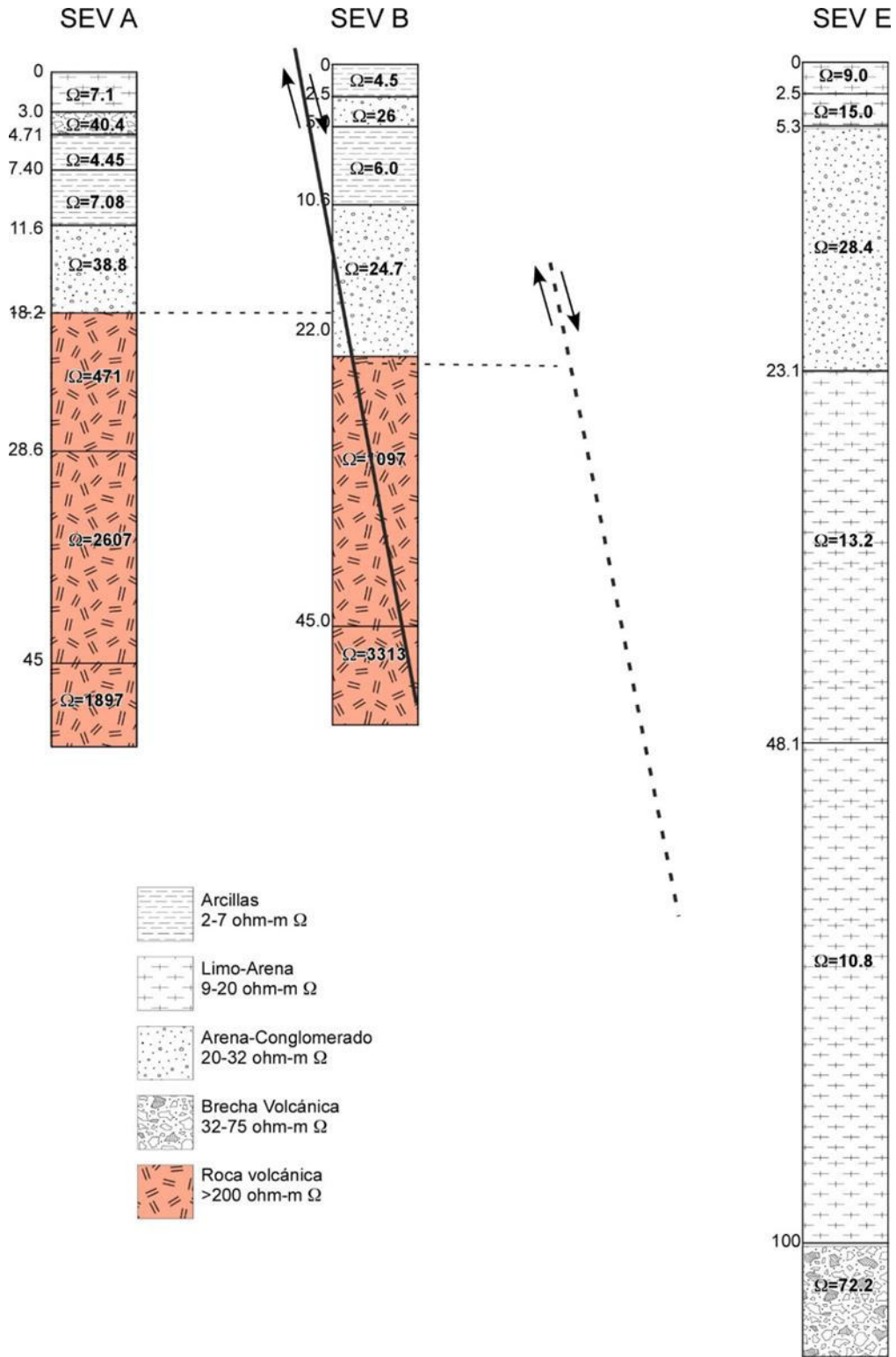


Figura 26. Columnas de las secciones A, B y E obtenidas mediante Sondeos Eléctricos Verticales SEV.

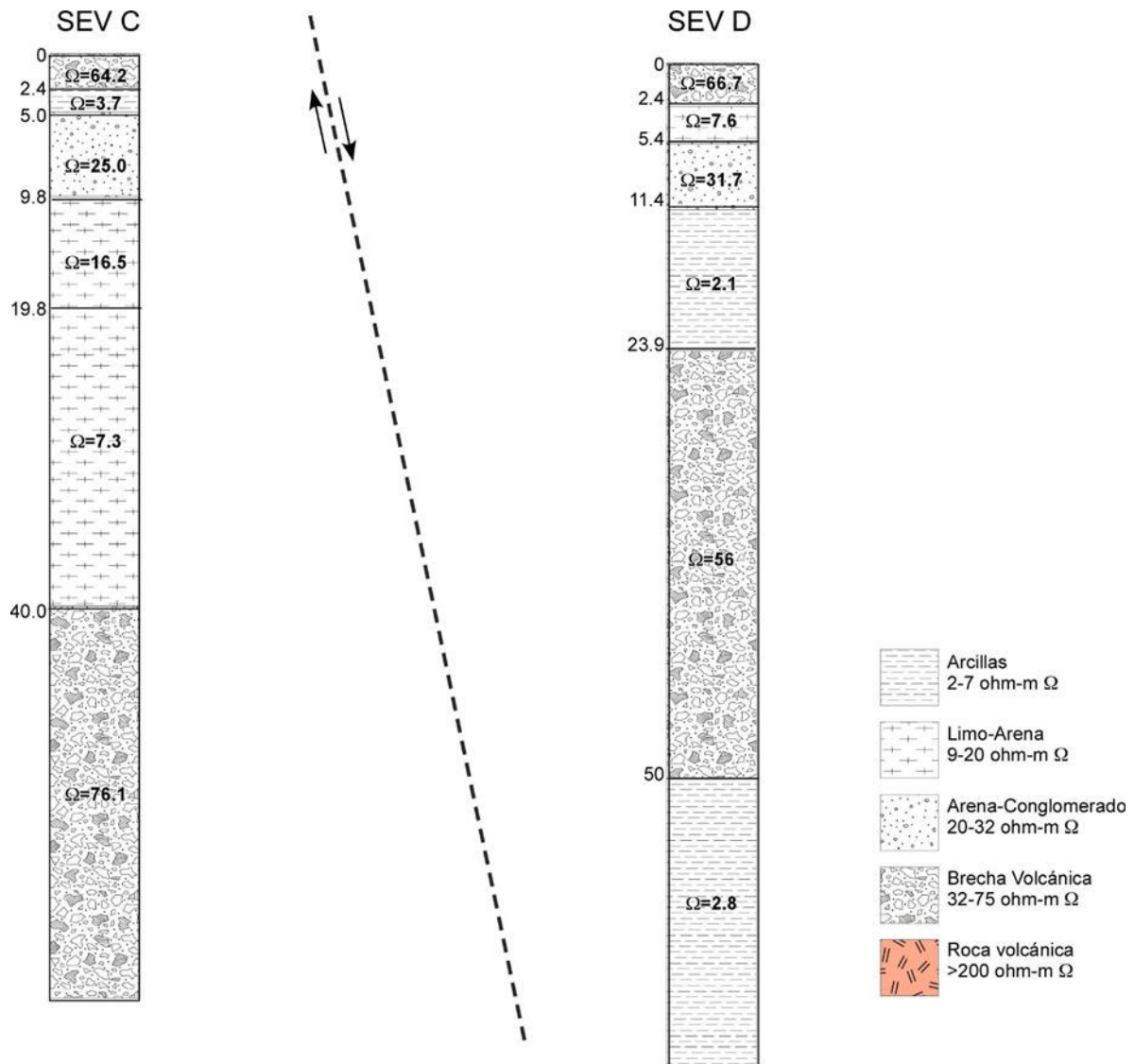


Figura 27. Columnas de las secciones C y D obtenidas mediante el Sondeos Eléctricos Verticales.

### 5.3 Discusión

#### 5.3.1 Potencial Natural

Las líneas de PN, levantadas de forma perpendicular a la falla, corroboraron la existencia de esta. De acuerdo con la interpretación existen fallas subparalelas enterradas. Las líneas de potencial natural graficadas en la figura 23, demuestran que la variación en la actividad hidroquímica en las zonas de falla puede evidenciarse por este método, lo cual ha sido demostrado también por otros autores (Murakami, H. et al., 1984). La sección levantada por el método de potencial natural (Figura 24), permitió inferir la existencia de las fallas subparalelas y bloques hundidos hacia el sur.

El contraste de valores de Potencial Natural se da por la actividad electroquímica del agua en los poros del sedimento, puede inferirse que debido a la falla el sedimento sea diferente de un bloque a otro.

### 5.3.2 Sondeo Eléctrico Vertical

Los sondeos eléctricos verticales se usaron para calibrar o comprobar el sentido de las lecturas y las interpretaciones del método de potencial natural.

El bloque del alto o el bloque hundido con relación a la falla “Laguna Seca” demuestra tener más de 3 m de desplazamiento vertical (Figura 26), pero al comportarse de forma escalonada los bloques se hunden hacia el sur, controlados por fallas subparalelas, pudiendo tener un desplazamiento mucho mayor a 100 m. Lo anterior se justifica por el SEV “e” (Figura 26), que fue posible medir sólo hasta 130 m de profundidad.

### **Significado tectónico de la Falla “Laguna Seca”.**

La comprobación de la existencia de la falla “Laguna Seca” pone en evidencia la existencia de otras fallas subparalelas al norte y al sur de esta. En la cuenca de la Independencia en el sector Laguna Seca, no habían sido cartografiadas fallas NE-SW que afectarán al relleno sedimentario Plioceno Pleistoceno.

Una revisión de la actividad tectónica reciente en los archivos históricos del Servicio Sismológico Nacional muestra que existe actividad sísmica en las cercanías de la falla “Laguna Seca”, tomando en cuenta que se registró un sismo de 3.7 en la escala de Richter, el día 15/11/2020 y que se ubica justo en la intersección de la falla “Laguna Seca” con la falla Pozo Blanco.

Debemos tomar en cuenta que la precisión de la ubicación de los sismos puede variar incluso en algunos kilómetros a la redonda de la ubicación reportada por lo que consideramos que este dato puede ser considerado como probable, pero no debe descartarse su posible actividad, en caso de reportarse más actividad sísmica en la zona.

## Capítulo 6 - Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

- Se probaron los métodos geoelectricos de Potencial Natural (PN) y resistividad eléctrica, por medio de sondeos eléctricos verticales (SEV), con el objeto de evidenciar la existencia de una anomalía geofísica de potencial natural y de resistividad eléctrica la cual en este trabajo se interpretó como una falla hipotética con orientación NE-SW que no había sido cartografiada previamente.
- El método de PN resultó ser un método efectivo y económico para usarse en la detección de fallas enterradas cubiertas o ciegas. La falla geológica identificada y que denominamos “Falla Laguna Seca”, es una falla que se infiere de tipo normal con el bloque

hundido de forma escalonada hacia el sur, la cual está segmentada por fallas sub-paralelas al trazo principal.

- Existe actividad sísmica registrada en las cercanías de la falla “Laguna Seca” con base en el registro de un sismo de magnitud 3.7 en la escala de Richter con fecha del 15/11/2020, ubicado (aproximadamente), en la intersección de la falla “Laguna Seca” (NE-SW) con la falla Pozo Blanco (N-S) paralela al sistema Falla San Miguel Allende-Taxco.

## 6.2 Recomendaciones

- Aplicar la metodología usada en la presente investigación, para comprobar la existencia de una probable falla paralela a la falla “Laguna Seca” y que se ubica 3 km al norte.
- Realizar un levantamiento de PN con una planificación de ubicación de electrodos en una malla geométrica y separación entre los mismos de forma sistemática para llegar a una interpretación más precisa.

## Referencias

Aceves, J. M. (2020). Análisis cartográfico y geoquímico en la zona sur de la Mesa Central en el área entre San Luis de la Paz y Tierra Nueva, México. Tesis de licenciatura. Universidad de Guanajuato.

Alaniz-Álvarez, S. A., & Nieto-Samaniego, Á. F. (2005). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 65-82.

Alaniz Ruiz, E. (2002). "Evolucion geologica de la cuenca de la Independencia y sus alrededores, estado de Guanajuato, Mexico". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, UNAM. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3476961>.

Alatorre-Zamora, M. A., Cortina, L., Campos-Enríquez, J. O., & Birch, F. S. (2008). Interpretación de anomalías de potencial espontáneo aplicada a un vertedero de desechos urbanos en el occidente de México. *e-Gnosis*, 6, 1-24.

Auge, M. (2008). Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea. Universidad de Buenos Aires, 30.

Castro, C., Corbo-Camargo, F., & Loza-Aguirre, I. (2021). Geophysical model of Cuenca de la Independencia aquifer. *Journal of Applied Geophysics*, 186, 104257.

CONAGUA, 2020. Actualización De La Disponibilidad Media Anual De Agua En El Acuífero Laguna Seca (1104) Estado De Guanajuato.42 pp.

Estrada, P. I. (2013). Prospección Geoelectrica. Universidad Nacional de Tucuman.

Jasso, M. A. (2019). Análisis Geoestadístico bayesiano para determinar la evolución de la disponibilidad de agua subterránea en el Acuífero Independencia, Guanajuato. Guanajuato, Mx.: Universidad de Guanajuato.

Knappett, P. S., Li, Y., Loza, I., Hernandez, H., Avilés, M., Haaf, D., ...& Nordstrom, D.K. (2020). Rising arsenic concentrations from dewatering a geothermally influenced aquifer in central Mexico. *Water Research*, 185, 116257.

Murakami, H., Mizutani, H., & Nabetani, S. (1984). Self-potential anomalies associated with an active fault. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 36(9), 351-376.

Ortega-Flores, B., Solari, L., Lawton, T. F., & Ortega-Obregón, C. (2014). Detrital-zircon record of major Middle Triassic–Early Cretaceous provenance shift, central Mexico: Demise of Gondwanan continental fluvial systems and onset of back-arc volcanism and sedimentation. *International Geology Review*, 56(2), 237-261.

Ortega-Guerrero, M. A. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. Querétaro, Mx: Revista Mexicana de Ciencias de la Tierra.

PAZ FLORES, A. (2007). INFORME DE LA CARTA GEOLÓGICO-MINERA SAN LUIS DE LA PAZ F14-C35, ESCALA 1:50,000. Servicio Geológico Mexicano. Informe Técnico, 40 p.

Polanía Betancourt, M. C. (2017). Caracterización geofísica usando prospección geoelectrica en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá.

Raisz, E. (1964). *Landforms of Mexico*: Cambridge, Massachusetts, United States, Office of Naval Research, Geography Branch. Mapa con texto, esc, 1, 3000000.

Randall Roberts, J. A. (1984). Potencial Natural (SP) en la búsqueda de Agua. Guanajuato: Universidad de Guanajuato.

Ramos-Leal, J. A., López-Loera, H., Martínez Ruiz, V. J., & Aranda-Gómez, J. J. (2007). Sucesión de eventos y geometría de la parte central del acuífero del graben Villa de Reyes (San Luis Potosí, México) inferida a partir de datos geoelectricos. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 24(1), 31-46.

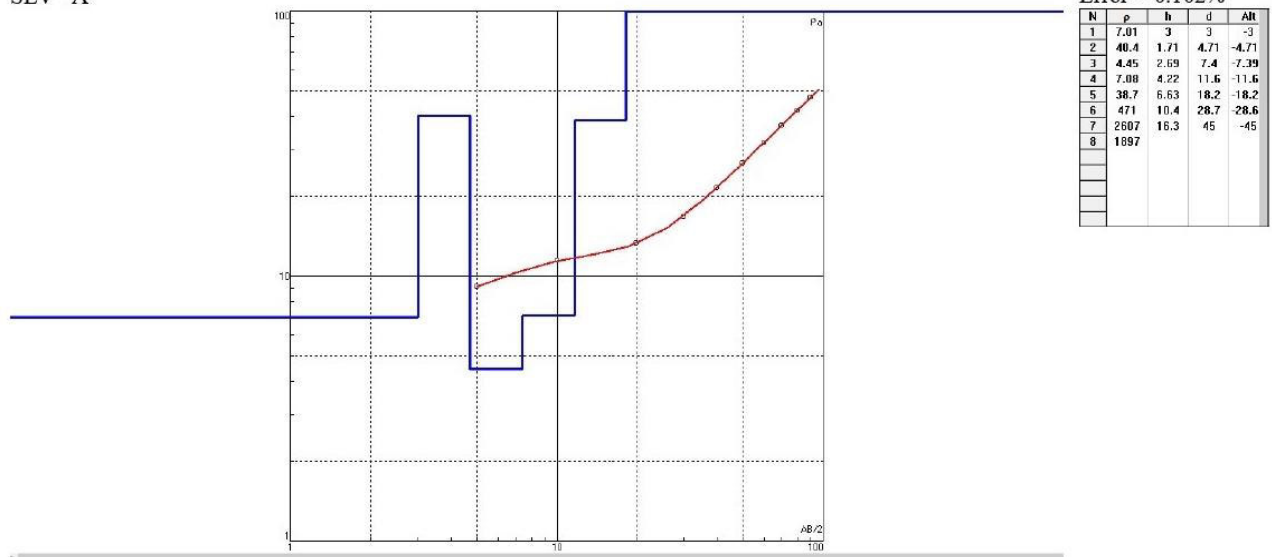
Revollo Mallma, R. (2015). Estudio geofisico por potencial espontaneo y resistividad en la variante de geotomografia electrica para la captacion de agua subterranea en el sector cruce la joya, distrito la joya, provincia y region arequipa.

Roberts, J. A. R. (2000). MÉTODOS ALTERNOS DE GEOFÍSICA EN LA BÚSQUEDA DE AGUA SUBTERRÁNEA. *Águas Subterrâneas*.

Zavala Reymer, H. H. (2021). Prospección geo-eléctrica aplicada a yacimientos de hierro, óxido de cobre y oro con el fin de delimitar la profundidad y extensión de la zona mineralizada y estructural para la unidad minera Pelayo.

# Anexos I.- SEV

SEV A

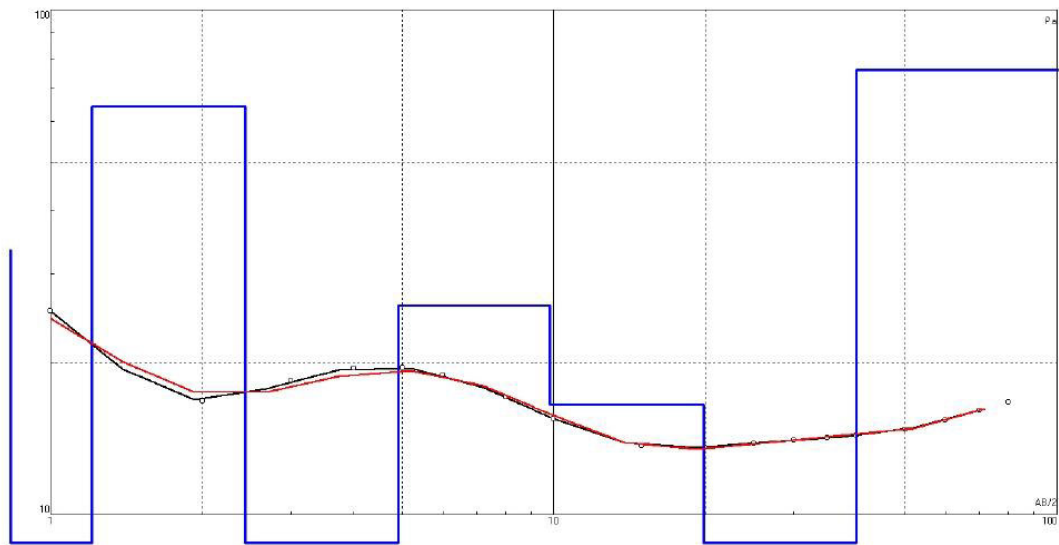


Example of data file comments

SEV B



sev\_c

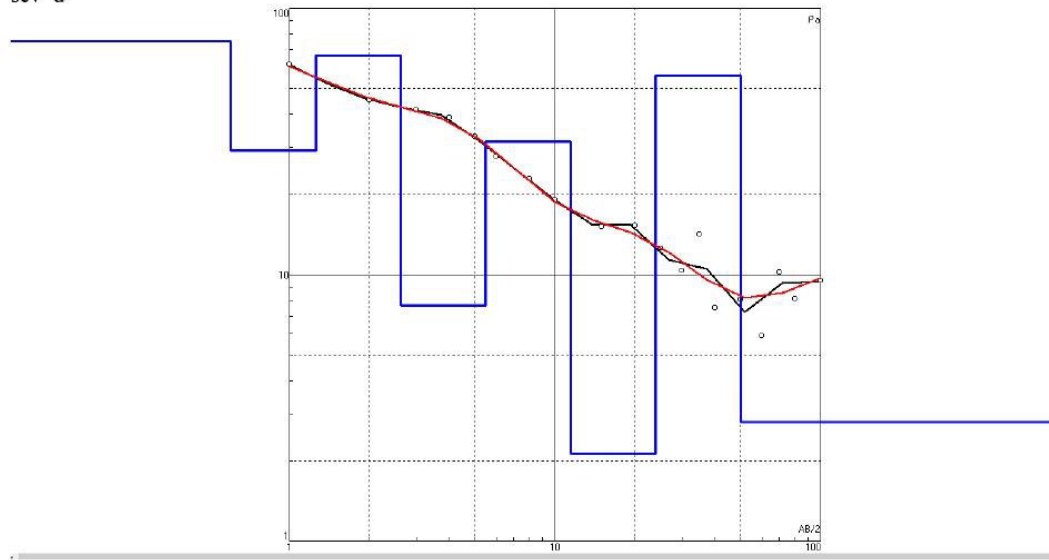


Error = 1.83%

N	p	h	d	AR
1	33.35	0.6	0.6	-0.6
2	6.777	0.6002	1.200	-1.2002
3	64.22	1.225	2.433	-2.4329
4	3.746	2.466	4.899	-4.899
5	25.99	4.966	9.865	-9.8648
6	16.5	10	19.06	-19.064
7	7.383	20.14	40	-40
8	76.01			



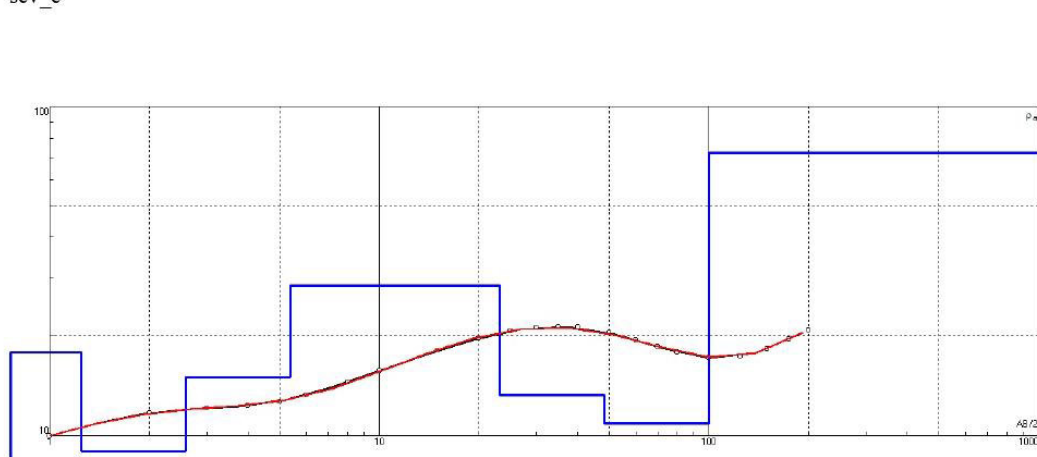
sev\_d



Error = 5.43%

N	p	h	d	Alt
1	75.1	0.6	0.6	-0.6
2	29.2	0.654	1.25	-1.25
3	66.7	1.37	2.62	-2.62
4	7.66	2.86	5.48	-5.47
5	31.7	5.97	11.4	-11.4
6	2.13	12.5	23.9	-23.9
7	56.1	26.1	50	-50
8	2.8			

sev\_e



Error = 0.431%

N	p	h	d	Alt
1	0.590	0.6	0.6	-0.6
2	17.94	0.6461	1.246	-1.246
3	9.004	1.342	2.588	-2.588
4	15.03	2.787	5.375	-5.374
5	28.48	17.82	23.19	-23.19
6	13.26	24.87	48.16	-48.15
7	10.89	51.85	100	-100.0
8	72.26			