



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Resistividad eléctrica de una secuencia  
evaporítica como herramienta para  
estudios paleoclimatológicos**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniera Geofísica**

**P R E S E N T A**

Maribel Sánchez García

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Priyadarsi Debajyoti Roy



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS ACADEMICOS**

A mi tutor de tesis el Dr. Roy Priyadarsi Roy por darme la oportunidad de conocer otras disciplinas, por brindarme la oportunidad de explorar otros ámbitos para la aplicación de la geofísica, por los consejos y paciencia.

A la Dra. Claudia Arango Galván por explicarme cada tema con sencillez y simpleza, por inspirarme a realizar un buen trabajo día con día.

Al laboratorio de Paleoambientes y Paleoclimas del Instituto de Geología, los recuerdos que conservo de este lugar siempre me harán feliz.

Al proyecto del DGAPA-PAPIIT de la UNAM con el número IN 102217 “Variabilidad climática en el nororiente de México desde el último máximo glacial y evaluación del efecto de la Alberca Caliente del Atlántico” por el financiamiento del muestreo y análisis geoquímicos.

Al proyecto CONACYT CB-237579 titulado “Reconstrucción del Monzón mexicano en escalas milenarias desde el penúltimo interglaciar en los subtrópicos de México: fuentes, forzamientos y distribución geográfica”, ya que recibí una beca por un periodo de diez meses.

Al proyecto UC-MEXUS Conacyt Collaborative Grant con el número (CN-16-122), titulado “The effects of abrupt warming on climate and hydrology in subtropical Mexico”, ya que recibí apoyo económico de su parte.

A la facultad de Ingeniería de la UNAM por cumplir su promesa acerca de “llorar lágrimas de sangre”, cada momento por más difícil que fuera siempre fue satisfactorio, por permitirme conocer a grandes profesores y personas.

Por último, a la Universidad Nacional Autónoma de México, siempre viviré orgullosa de saber que formo parte de ella.

## AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mi mamá por enseñarme como ser una buena persona, a demostrarme que el amor no está solo en las palabras. A mi papá por quererme tal y como soy, incluso con el cabello corto, son los mejores padres del mundo, han sabido criar excelentes personas y gracias por cada día mostrarme lo que es el esfuerzo, además de permitirme vivir siempre rodeada de animales. A Mary Cruz por ser el mejor ejemplo, por ser la mejor hermana del mundo (aunque sigo dudando un poco si realmente eres parte de esta familia). A José Joel por ser una jalada y hacerme reír todos los días; Chico eres de lo mejor no te rindas sé que lograras cosas grandes. A mi tía Chabela por apoyarme día a día, por las desveladas, por los no regaños, sin ti esto jamás hubiera sido posible. A mi tía Mary por ser dura y decir siempre las cosas de frente, por ponerme un alto cuando es necesario, por conocerme mejor que nadie. Realmente los amo, familia

Monse gracias por escucharme, cuidarme y quererme por tanto tiempo, realmente sigo sin entender cómo surgió nuestra amistad, como ha sobrevivido después de tanto tiempo, solo sé que a veces así son las cosas la magia no puede explicarse solo vivirse. Nuestras pequeñas versiones de secundaria estarían muy orgullosas y felices de ver en lo que nos hemos convertido.

Ana, Mariana, Aby y Adriana como nos reímos durante la secundaria, como nos hemos reído en nuestros encuentros. Amigas, soy feliz de que pese al tiempo, pese a no hablar durante grandes lapsos podamos volver a ser nosotras cuando estamos juntas.

A Yamel, por devolverme la fe en las personas, por ser mi primer amiga de la preparatoria, por corregir mi mala ortografía y por acompañarme incluso en mis momentos más deprimentes. A Susanita por estar más allá del bien y del mal, siempre te agradeceré por estar conmigo. A Misael por pasar tus tres años de preparatoria junto a mi (la vida nos quería juntos), por ayudarme durante la licenciatura con mis programas, por ser mi amigo pese a todo.

A mis amiguitas, besitos en su hombro niñas... Tatiana, aunque lamento que en un principio no fuéramos tan amigas, agradezco la competitividad entre nosotras nos impulsó a ser mejores y nos permitió demostrarnos que nuestra amistad es de verdad, sabes que siempre contarás conmigo. A Liz porque sin ti no estaría viva, de cuantas no me has salvado. Liziernaga los momentos junto a ti siempre son de lo mejor. Pequeña Citlali, tu siempre me escuchas y me das el mejor consejo que tienes, hemos reído y llorado, sé que hay muchas cosas por delante (cosas grandes, así que no tengas miedo porque estoy junto a ti). Nenitas, las quiero muchísimo, cuando estamos juntas es como si todo encajara perfectamente, gracias por decir que sí cuando pregunte si podía estar con ustedes. La carrera no habría sido igual sin ustedes.

A Carito, por siempre creer en mí, por escucharme en mis momentos de estrés, por entenderme y compartir los mismos gustos. Me alegra tanto haber escrito en tu perfil de Facebook diciéndote lo parecida a Mafalda que eras, así comenzó esta amistad. Carito ten más fe en ti, yo sé que te esperan cosas grandes.

A Irma, Ale, Fer, Agesandro y Memo porque sin ustedes el laboratorio sería súper aburrido y frío. Me encanta comer junto a ustedes, ¡¡los quiero chicos!! Tienen que extrañarme mucho cuando ya no este.

Por ultimo a Dios, por poner a todas estas personas en mi camino.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>3</b>
<b>Introducción y Objetivos</b> .....	<b>3</b>
1.1. <i>Introducción</i> .....	3
1.2. <i>Objetivo general</i> .....	4
1.3. <i>Objetivos específicos</i> .....	4
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>5</b>
<b>Antecedentes</b> .....	<b>5</b>
2.1. <i>Zona de estudio</i> .....	5
2.2. <i>Clima</i> .....	5
2.3. <i>Geología</i> .....	6
2.3.1. <i>Geología Regional</i> .....	6
2.3.2. <i>Geología del lugar</i> .....	9
<b>CAPITULO 3</b> .....	<b>10</b>
<b>Marco Teórico</b> .....	<b>10</b>
3.1. <i>Fundamentos teóricos</i> .....	10
3.1.1. <i>Propiedades eléctricas de las rocas</i> .....	10
3.1.2. <i>Ecuaciones generales</i> .....	11
3.2. <i>Campo eléctrico</i> .....	12
3.3. <i>Diferencia de Potencial entre dos electrodos M y N</i> .....	15
3.4. <i>Resistividad Aparente</i> .....	15
3.5. <i>Dispositivo electródico</i> .....	16
3.5.1. <i>Arreglos electródicos comunes</i> .....	17
3.6. <i>Sondeos en 1D, 2D y 3D</i> .....	19
3.6.1. <i>Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) o 1D</i> . .....	19
3.6.2. <i>Calicatas eléctricas</i> .....	20
3.6.3. <i>Sondeos eléctricos en 2D o tomografía de resistividad eléctrica (TRE)</i> .....	20
3.6.4. <i>Sondeos en 3D</i> .....	21

3.7. <i>Profundidad de investigación</i> .....	21
<b>CAPITULO 4</b> .....	<b>23</b>
<b>Material y Métodos</b> .....	<b>23</b>
4.1. <i>Adquisición de datos</i> .....	23
4.1.1. Trabajo de campo .....	23
4.1.2. Tomografía de resistividad eléctrica (TRE) .....	24
4.2. <i>Trabajo de Laboratorio</i> .....	25
4.3. <i>Concentración de análisis de elementos mayores y trazas</i> .....	26
4.4. <i>Análisis de Carbono Inorgánico Total (TIC)</i> .....	28
<b>CAPITULO 5</b> .....	<b>30</b>
<b>Resultados</b> .....	<b>30</b>
5.1. <i>Resultados geológicos y geoquímicos</i> .....	30
5.1.1. Textura de los sedimentos .....	30
5.1.2. Control Cronológico.....	31
5.1.3. Concentración de carbonatos, cloruros y sulfatos .....	32
5.2. <i>Procesamiento y análisis de datos geofísicos</i> .....	35
5.2.1. Técnica de inversión de datos .....	35
5.2.2. Resultados .....	38
<b>CAPITULO 6</b> .....	<b>43</b>
<b>Discusión de resultados</b> .....	<b>43</b>
6.1. <i>Integración de datos</i> .....	43
6.1.1. Análisis de los perfiles geoelectricos .....	43
6.1.2. Correlación entre la secuencia evaporítica y el perfil geoelectrico (arreglo Wenner)	45
<b>CAPITULO 7</b> .....	<b>51</b>
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	<b>51</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>53</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de la República mexicana donde se muestra la ubicación de la zona de estudio. ....5	5
Figura 2 Temperatura media normal y precipitación por mes durante 1951-2010 en la estación San Ignacio Texas, en el municipio de Galeana ( <a href="https://smn.cna.gob.mx">https://smn.cna.gob.mx</a> ). .....6	6
Figura 3 Bosque Estructural del Noreste de México (Tardy, 1977). .....7	7
Figura 4 Provincias del estado de Nuevo León. Fuente: INEGI. Síntesis de información Geográfica del estado de Nuevo León. INEGI. Anuario Estadístico del estado de Nuevo León. INEGI. Continuo Nacional Topográfico S. II escala 1:250 000. INEGI. ....9	9
Figura 5 Geología de la zona de estudio, el triángulo rojo representa la ubicación de trinchera, la línea punteada azul corresponde a los límites de la cuenca (Adaptado de INEGI, febrero 2019). ....9	9
Figura 6 Diagrama esquemático que muestra la clasificación de la conductividad eléctrica en los materiales geológicos (Orellana, 1974). .....11	11
Figura 7 Líneas de corriente y potencial de dos tomas de corriente en un medio homogéneo. ....13	13
Figura 8 Distribución de los electrodos en un medio homogéneo. ....15	15
Figura 9 Medio heterogéneo con diferentes resistividades. ....16	16
Figura 10 Dispositivo electródico con electrodos de corriente A-B y electrodos de potencial M-N. ....16	16
Figura 11 Variaciones en la disposición de los electrodos para el arreglo Wenner; A) Wenner Alpha, B) Wenner Beta y C) Wenner Gamma.....18	18
Figura 12 Disposición de los electrodos para el arreglo Dipolo-Dipolo. ....18	18
Figura 13 Disposición de los electrodos para el arreglo Wenner-Schlumberger. ....19	19
Figura 14 Diagrama esquemático de un modelo 1D para 3 capas .....20	20
Figura 15 Diagrama esquemático de un modelo de sondeo 2D para una línea de 20 electrodos (Adaptado de Loke y Barker, 1995). ....21	21
Figura 16 Gráficos de la función de sensibilidad para los arreglos Wenner y Polo-Polo (Loke, 2015). ....22	22
Figura 17 Fotografía de los sedimentos expuestos en la trinchera SAN-1 con una profundidad de 300 cm en la cuenca SANDIA. ....23	23
Figura 18 Ubicación de la trinchera y la línea de tomografía eléctrica (Imagen modificada de Google Earth).....24	24
Figura 19 Resistivímetro SYSCAL Pro Switch 48 de Iris Instrument utilizado para la tomografía de resistividad eléctrica de los sedimentos en la Cuenca Sandia. ....25	25
Figura 20 Mortero de ágata utilizado para moler las muestras obtenidas en la cuenca de Sandia. 25	25
Figura 21 Difractómetro portátil NITON FXL 950 de la marca Thermo Scientific utilizado para el análisis de elementos mayores y trazas. ....27	27
Figura 22 Muestras de la cuenca Sandia empaquetadas para el análisis de fluorescencia de rayos X. ....28	28
Figura 23 Equipo Thermo Scientific HiperTOC utilizado para medir la concentración de Carbono Inorgánico Total (TIC) en las muestras de la cuenca Sandia. ....29	29

Figura 24 Textura de los sedimentos del perfil sedimentario de la cuenca Sandia expuesta en la trinchera con profundidad de 300 cm.....	30
Figura 25 Gráfico que muestra la calibración del valor de edad convencional a edad calendario antes del presente (1950) utilizando el software Calib 7.1 (Reimer et al. 2019). El eje X representa los años calibrados antes del presente (BP, Before Present o antes del presente) y el eje Y es la edad obtenida por análisis de radiocarbono.....	32
Figura 26 Variación de las sales minerales con respecto a la profundidad en la trinchera SAN-1. Las líneas rojas marcan la separación entre unidades.....	34
Figura 27 Perfil geoelectrico de la tomografía de resistividad eléctrica utilizando el arreglo Dipolo-Dipolo para un espaciamiento entre electrodos de 1 m en la cuenca Sandia.....	40
Figura 28 Perfil geoelectrico de la tomografía de resistividad eléctrica utilizando el arreglo Wenner-Schlumberger para un espaciamiento entre electrodos de 1 m en la cuenca Sandia.....	41
Figura 29 Perfil geoelectrico de la tomografía de resistividad eléctrica utilizando el arreglo Wenner para un espaciamiento entre electrodos de 1 m en la cuenca Sandia.....	42
Figura 30 Comparación del comportamiento de la resistividad eléctrica de los tres perfiles geoelectricos. Las líneas naranjas discontinuas corresponden al límite de cada capa, las estructuras presentes en el perfil están delimitadas con líneas punteadas negras.....	44
Figura 31 Perfil geoelectrico obtenido con el arreglo Wenner. El rectángulo gris representa la zona que se correlaciono con los registros de sales minerales. La línea discontinua morada corresponde a la división de unidades sedimentarias 0(Unidad 3:300-62 cm, Unidad 2: 62-27 cm, Unidad 1: 27-0 cm. Las Líneas discontinuas naranjas corresponden a las capas geoelectricas encontradas.....	46
Figura 32 Comparación entre la resistividad eléctrica de la trinchera y la variación en la concentración de cloruros. La línea discontinua roja marca el inicio de la Unidad 3 (300-62 cm), las líneas amarillas discontinuas corresponden a las capas geoelectricas encontradas con la tomografía eléctrica.....	47
Figura 33 Rangos de resistividad típicos para diferentes materiales de la Tierra (Palacky, 1987).	47
Figura 34 Comparación entre la resistividad eléctrica de la trinchera y la variación en la concentración de sulfatos. La línea discontinua roja indica el inicio de la Unidad 3 (300-62 cm), las líneas amarillas discontinuas corresponden a las capas geoelectricas encontradas con la tomografía eléctrica.....	48



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Valores de la profundidad de investigación para los dispositivos electródicos Dipolo-Dipolo y Wenner (Adaptado de Temer y Cherchali, 2018) . . . . .	22
Tabla 2. Valor del análisis por radiocarbono y fecha calibrada con el software Calib 7.1 (Reimer et al. 2019) para la muestra a una profundidad de 262-264 cm. . . . .	31
Tabla 3. Valores máximos, mínimos y promedio de las concentraciones de sales minerales dividido por carbonatos, cloruros y sulfatos. La concentración de sulfatos presenta los valores máximos a lo largo del perfil sedimentario. Por otro lado, el contenido de cloruros es mínimo. ....	33
Tabla 4 Clasificación geoelectrica de rocas sulfatadas (Guinea et al. 2012) . . . . .	49
Tabla 5 Correspondencia entre resistividad eléctrica y textura de los sedimentos detríticos no consolidados (Tapias et al. 2005) . . . . .	50

## RESUMEN

La Paleoclimatología es el estudio exhaustivo de los suelos/sedimentos depositados en las cuencas sedimentarias, utilizando diferentes herramientas como la geoquímica, micropaleontología, sedimentología y geocronología, para inferir condiciones climáticas del pasado geológico. Sin embargo, los alcances de estas técnicas directas suelen ser puntuales espacialmente, y su aplicación suele ser demandante y en ocasiones muy costosa. En este sentido, el presente trabajo pretende evaluar una técnica indirecta para una estimación más extensa y más asequible. El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento de la resistividad eléctrica del subsuelo con respecto a la textura y abundancia de diferentes evaporitas (sales minerales) para así apoyar en los estudios paleoclimatológicos en la ubicación de sitios potenciales para perforación y recolección de muestras en trabajos futuros de investigación. La cuenca sedimentaria denominada Sandia, está ubicada en el estado de Nuevo León (México), en el margen occidental de la Sierra Madre Oriental. Se realizó el estudio de las texturas de los sedimentos, así como la estimación de la abundancia de diferentes evaporitas en una trinchera con profundidad de 300 cm (SAN-1). Adicionalmente, se adquirió una sección de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) cerca de la trinchera utilizando diferentes arreglos. Con fines comparativos, se construyó una columna estratigráfica, la cual se dividió en tres unidades desde la base hasta la cima (300-62 cm: limo con yeso; 62-27 cm: limo; 27-0 cm: limo-arena) con base en los cambios de textura y color de los sedimentos. También se midieron concentraciones de cloruros (0.08-0.21%), carbonatos (0.65-2.59%) y sulfatos (1.10-82.66%). Al comparar la variación de la textura y la presencia de sales minerales con los modelos geoeléctricos, se observó que la TRE no resulta conveniente para delimitar capas de sedimentos con grosores menores a 1m, debido a la resolución restringida por la separación electródica. Sin embargo, a profundidades mayores de 1 m, la técnica geofísica permitió la detección de la unidad más profunda (300-62 cm), presentándose con valores de resistividad eléctrica menores a  $47 [\Omega \cdot m]$ . En esta unidad se observaron dos tendencias en la concentración de cloruros (0.17 % y 0.11 %) y sulfatos (64.89 % y 65.97%), sin embargo, la diferencia entre estas dos tendencias es mínima por lo que no tendrá un efecto sobre los cambios de resistividad eléctrica de la zona. El comportamiento de esta propiedad física se asocia a tres posibles factores: 1) La matriz se conforma predominantemente de material clástico en comparación con la abundancia de evaporitas, 2) El grado de pureza de los yesos presentes en la tercera unidad y 3) La compactación y el tamaño de los sedimentos de la zona, así como su contenido de agua.

## **ABSTRACT**

Paleoclimatology is the study of climatic conditions of the geological past and it uses different methodologies like geochemistry, micro-paleontology, sedimentology and geochronology in the soils and sediments of the sedimentary basins. However, most of these studies are pointwise and lack spatial coverages. In some cases, this study can be difficult and very expensive too. In this context, the present research intends to evaluate a geophysical methodology that makes this study more extensive as well as affordable. The main objective of this thesis is to evaluate the behavior of the electrical resistivity of the subsoil with respect to the sediment texture and abundances of different evaporite minerals (salts) for optimizing the efforts to locate potential sites for the sampling in the future research works. The Sandia basin is a sedimentary basin located in the rain shadow of the Sierra Madre Oriental Mountains in the state of Nuevo Leon (Mexico). The samples collected in a pit of 300 cm depth (SAN-1) were studied for sediment texture and abundances of different evaporite minerals. Additionally, an electrical resistivity tomography (ERT) with different arrangements was performed near the sampled pit. Stratigraphy of the pit comprises of three different units from the base to the top (300-62 cm: silt with gypsum; 62-27 cm: silt; 27-0 cm: silt-sand) based on the observed changes in texture, color and primary structures of the sediments. Sediments contain chlorides (0.08-0.21%), carbonates (0.65-2.59%) and sulphates (1.10-82.66%). The comparison of the sediment texture and abundances of evaporites with the geo-electric models suggests that ERT could not delimit the sedimentary layers with thickness lower than 1 m (e.g. sediments of 62-0 cm) due to the resolution restricted by separation distance between the electrodes. However, the geophysical tool allowed detection of sediment layers with thickness bigger than 1 m (e.g. sediments of 300-62 cm), with electrical resistivity values less than 47 [ $\Omega\cdot m$ ]. In this unit, two trends were observed in the concentrations of chlorides (0.17 % and 0.11 %) and sulphates (64.89 % and 65.97%). These differences in trends of evaporites are minimal to have any effect on the electrical resistivity in the area. The change in behavior of this physical property is associated with three possible factors: 1) the matrix is formed predominantly of clastic material compared to the abundance of evaporites, 2) the degree of purity of the gypsum present in the third unit and 3) the compaction and grain size of the sediments, as well as their water content.

## Introducción y Objetivos

### 1.1. Introducción

La “Paleoclimatología” es una ciencia interdisciplinaria para el estudio de las condiciones climáticas del pasado. Se utilizan herramientas de diferentes disciplinas como la Paleontología, Geología, Geoquímica, Sedimentología, entre otras ciencias. El conocimiento del clima del pasado geológico, así como sus ambientes terrestres durante intervalos cálidos y fríos ocurridos hace varios miles y millones de años permiten conocer la evolución de la historia de la Tierra. Se pueden generar modelos para inferir las condiciones climáticas en un futuro cercano con la ayuda de datos representativos del clima del pasado. Esto con la finalidad de mitigar los efectos del calentamiento global causado por procesos antrópicos actuales. En esta disciplina la recolección de datos se realiza a partir de “*proxies*”, es decir, indicadores naturales indirectos donde quedan registrados las condiciones climáticas del pasado y los procesos que generaron cambios. Estos indicadores deben cumplir dos características: 1) ser sensibles a los cambios presentes en el ambiente donde se desarrollan; 2) conservarse a través del paso del tiempo de manera inalterada. Los *proxies* pueden tener un origen biológico (e.g. diatomeas, ostrácodos, foraminíferos o polen), físico (e.g. tamaño de partículas, susceptibilidad magnética) o químico (e.g. composición isotópica, concentración elemental o materia orgánica). Los sedimentos que se han depositados en el fondo de los lagos son una valiosa fuente de información de los ambientes terrestres, ya que son indicadores del efecto causado por el cambio climático global sobre algún ecosistema. Se debe perforar el fondo de una cuenca donde se analizará la composición mineralógica y fosilífera de los sedimentos. Este procedimiento suele ser puntual espacialmente, además de costoso y demandante.

La interacción entre la biosfera, geosfera e hidrosfera se percibe con mayor visibilidad en los sedimentos de los lagos, ya que por su tamaño y ubicación la respuesta ante los cambios de ambiente es más rápido. La facilidad con la que varía la proporción iónica, la salinidad y los parámetros físicoquímicos de los cuerpos de agua ante los cambios climáticos, hace que los sedimentos lacustres sean registros que permiten enriquecer el conocimiento sobre la variabilidad ambiental a gran escala (Anadon *et al.*, 1991). Trabajar con sedimentos lacustres resulta ventajoso debido a su amplia distribución geográfica y ambiental, la rapidez de sedimentación suele ser rápida y preservación de los registros continuos. Las características de los sedimentos pueden compararse con sus contrapartes modernas en el mismo lago para obtener la calibración de los datos “*proxie*” y obtener datos cuantitativos de los parámetros meteorológicos. Estos se conforman de carbonatos, evaporitas, fragmentos de roca, carbón, organismos y componentes de plantas. Los datos de estos componentes generados a partir de análisis químicos son usados como elementos para la reconstrucción del clima. Las rocas evaporíticas son interesantes debido a que son indicadores de condiciones ambientales del pasado. Estos depósitos se componen de minerales que se originan durante la evaporación de soluciones salinas, siguiendo una secuencia definida el grado de evaporación estará controlado por la temperatura del ambiente.

Las técnicas de investigación indirectas como la tomografía de resistividad eléctrica (por sus siglas en español TRE) es una herramienta utilizada para obtener una imagen de la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo. Algunas de las ventajas de este método es que los equipos utilizados para la recolección de información, así como la inversión y procesado de los datos es rápido, lo que permite que la interpretación de los datos se realice en tiempos relativamente cortos. Además, al ser es una técnica no invasiva permite definir las características del subsuelo, lo que permite mapear una zona sin destruir el objeto de estudio (Tabbagh *et al.*, 2000). Existe muy poca bibliografía acerca del uso de tomografía eléctrica para mapear la respuesta de secuencias evaporíticas (Lugo *et al.*, 2008), ya que gran parte de los trabajos se centran en la caracterización de depósitos de yeso (Lugo *et al.*, 2008, Guinea *et al.*, 2009, Guinea *et al.*, 2000a, Guinea *et al.* 2010, Guinea *et al.*, 2012). Con lo anteriormente explicado, este trabajo de tesis pretende encontrar una correlación entre la concentración de secuencias evaporíticas (carbonatos, cloruros y sulfatos) y la textura de los sedimentos con la respuesta de la resistividad eléctrica en el subsuelo de la cuenca Sandía, ubicada en el estado de Nuevo León. El objetivo de dicha correlación consiste en definir si la tomografía de resistividad eléctrica puede ser una técnica que permita conocer que tan viable resulte la perforación y recolección de muestras en una zona, esto como apoyo a futuros trabajos de investigación de Paleoambientes y Paleoclimas del Cuaternario Tardío.

## **1.2. Objetivo general**

Evaluar el comportamiento de la resistividad eléctrica del subsuelo y su relación con la textura y abundancia de diferentes evaporitas (sales minerales) para así apoyar en los estudios paleoclimatológicos en la ubicación de sitios potenciales para perforación y recolección de muestras en trabajos futuros de investigación.

## **1.3. Objetivos específicos**

Describir la columna estratigráfica basándose en la textura de los sedimentos.

Cuantificar las concentraciones de carbonatos, cloruros y sulfatos, así como determinar las concentraciones máximas y mínimas, analizando su comportamiento por unidades.

Correlacionar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo obtenida mediante la técnica de tomografía de resistividad eléctrica con la columna estratigráfica, así como con las abundancias de las evaporitas.

## CAPITULO 2

### Antecedentes

#### 2.1. Zona de estudio

La cuenca de Sandia el grande se ubica en la parte sureste del estado de Nuevo León, en la localidad de La Soledad perteneciente al municipio de Aramberri (Figura 1 y 2). La carretera más cercana para acceder a la zona es la Carretera 61 de Nuevo León. La localidad próxima a esta zona se llama Sandia el Grande, esta cuenta con un total de 995 habitantes (INEGI, 2010).

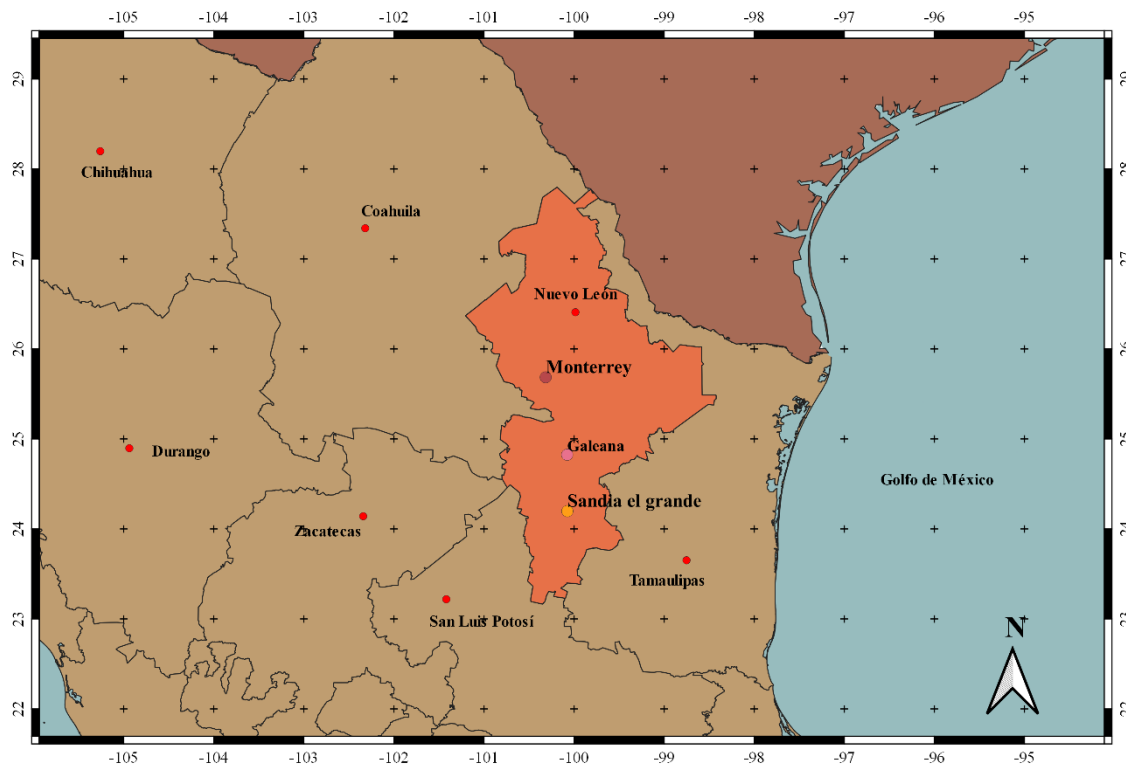


Figura 1 Mapa de la República mexicana donde se muestra la ubicación de la zona de estudio.

#### 2.2. Clima

El clima predominante en el estado de Nuevo León, utilizando la clasificación de Köppen se asocia a climas secos (**B**) (Köppen, 1918), se tienen dos variantes: árido o muy seco (**Bw**) y semiárido a seco (**Bs**). Las zonas áridas se caracterizan por tener una precipitación anual menor a los 350 mm y temperaturas anuales que varíen entre 15 y 25 °C (Tarango, 2005).

La estación climatológica denominada San Ignacio Texas (24.3104°, -100.1894°) más cercana a la zona se encuentra en el municipio de Galeana, aproximadamente a 16 m de la zona de estudio. La información climatológica se obtuvo a partir de esta estación durante un periodo 59 años (1951-2010). Se observó una temperatura media anual de 18.6 °C, en ese intervalo de tiempo el mes con mayor temperatura fue mayo con 20.9 °C. Por

otro lado, la precipitación anual fue de 307 mm, de la misma forma mayo fue el mes con mayor precipitación con 63.7 mm (Figura 2).

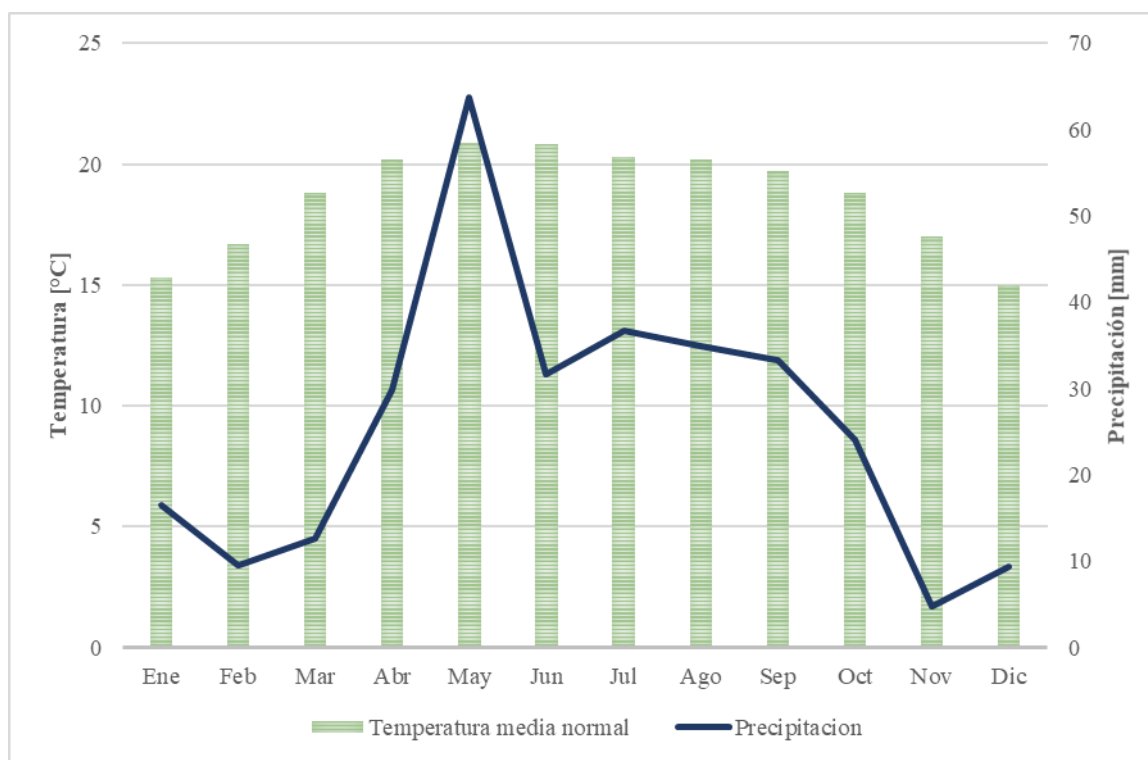


Figura 2 Temperatura media normal y precipitación por mes durante 1951-2010 en la estación San Ignacio Texas, en el municipio de Galeana (<https://smn.cna.gob.mx>).

## 2.3. Geología

### 2.3.1. Geología Regional

El estado de Nuevo León se ubica al norte de la línea del trópico de Cáncer, dicha ubicación le da sus rasgos principales de aridez, en el límite de dos provincias geológicas: la Sierra Madre Oriental (SMO), la cual sirve como barrera para detener los vientos húmedos del Golfo y la planicie Costera del Golfo (PGF). El clima predominante de esta zona es semiárido y extremo, la mayor parte de la vegetación consta de matorrales bajos.

Las rocas más antiguas que conforman la parte Noreste de la república mexicana corresponden a granulitas, cuarcitas y gneises de una edad Grenvilliana (Montalvo-Arrieta *et al.*, 2011). Dos eventos ocurridos durante el Mesozoico que forman parte del desarrollo geológico de esta zona fueron: 1) la separación del supercontinente Pangea y el subsecuente rift que permitió la apertura del Golfo de México y 2) la subducción de la Placa Farallón en el Oeste de México. Estos sucesos abarcan edades que van desde el Precámbrico al Cuaternario. Durante el Jurásico Tardío, esta área fue transgredida por aguas marinas, ocasionando el depósito de secuencias de rocas terrígenas clásticas carbonatadas y evaporíticas. Estas rocas suelen presentarse plegadas en formaciones

verticales en las montañas y horizontales en las llanuras. Las rocas pertenecientes a esta región se componen de calizas, areniscas, lutitas, margas, brechas, conglomerados, arcillas y yeso.

La SMO es un relieve morfoestructural curvado que se ubica desde la Faja Volcánica Transmexicana, hasta la proximidad de la ciudad de Torreón, Coahuila, atravesando a el estado de Nuevo León, se compone de sedimentos marinos mesozoicos y continentales deformados durante el Cenozoico (Tardy, 1977). Las rocas sedimentarias que componen a la SMO se depositaron durante el desarrollo de una margen pasiva que se relaciona con la formación del Golfo de México.

Tardy (1977) fisiográficamente divide a la Sierra Madre Oriental en tres secciones (Figura 3):

- La cuenca de Sabinas (Humphrey, 1956) compuesta de pliegues simples que van de Rio Grande del Norte, hasta las cercanías de Monterrey, Nuevo León.
- La provincia de las Plataformas de Coahuila y Valles-San Luis Potosí ubicada entre la Plataforma de Texas y cerca del poblado de Xilitia, San Luis Potosí. Estas se ven interrumpidas por una serie de sierras altas entre Torreón y Monterrey.
- Una provincia de la cadena alta ubica entre Torreón, Coahuila y Aramberri, Nuevo León.

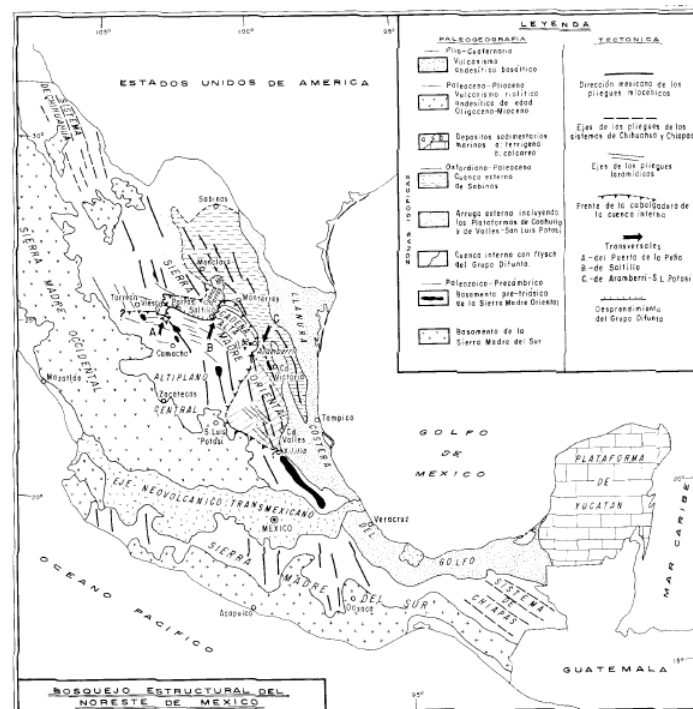


Figura 3 Bosque Estructural del Noreste de México (Tardy, 1977).

De acuerdo a INEGI síntesis geográfica el estado de Nuevo León se encuentra dentro de tres provincias geográficas (Figura 4):

- Llanura Costera del Golfo, abarca la porción central del estado de Nuevo León. La mayor parte de esta región corresponde a rocas del Cretácico Superior (lutitas). Las



zonas más jóvenes se asocian a material aluvial del Cuaternario. Hay presencia de pliegues pequeños y fallas.

- Sierra Madre Oriental, se encuentra en la parte occidental del estado de Nuevo León. Las rocas más antiguas corresponden a esquistos del Precámbrico, a su vez se conforma por afloramientos de areniscas del Jurásico. Así como, asociaciones de lutitas areniscas del triásico. Las estructuras geológicas presentes son pliegues anticlinales y sinclinales, los cuales se ven afectados por fallas de tipo normal e inversas.
- Gran Llanura Norteamericana, ubicada en la porción nororiental del estado de Nuevo León. Se conforma por asociaciones de lutitas y areniscas, además de afloramientos de lutitas del Cretácico Superior. En la parte sureste de esta provincia se encuentran sedimentos marinos y clásticos del terciario. El material aluvial de la zona corresponde al Cuaternario. Se puede encontrar pliegues sinclinales y anticlinales ocurridos por la deformación de rocas sedimentarias del Cretácico Superior.

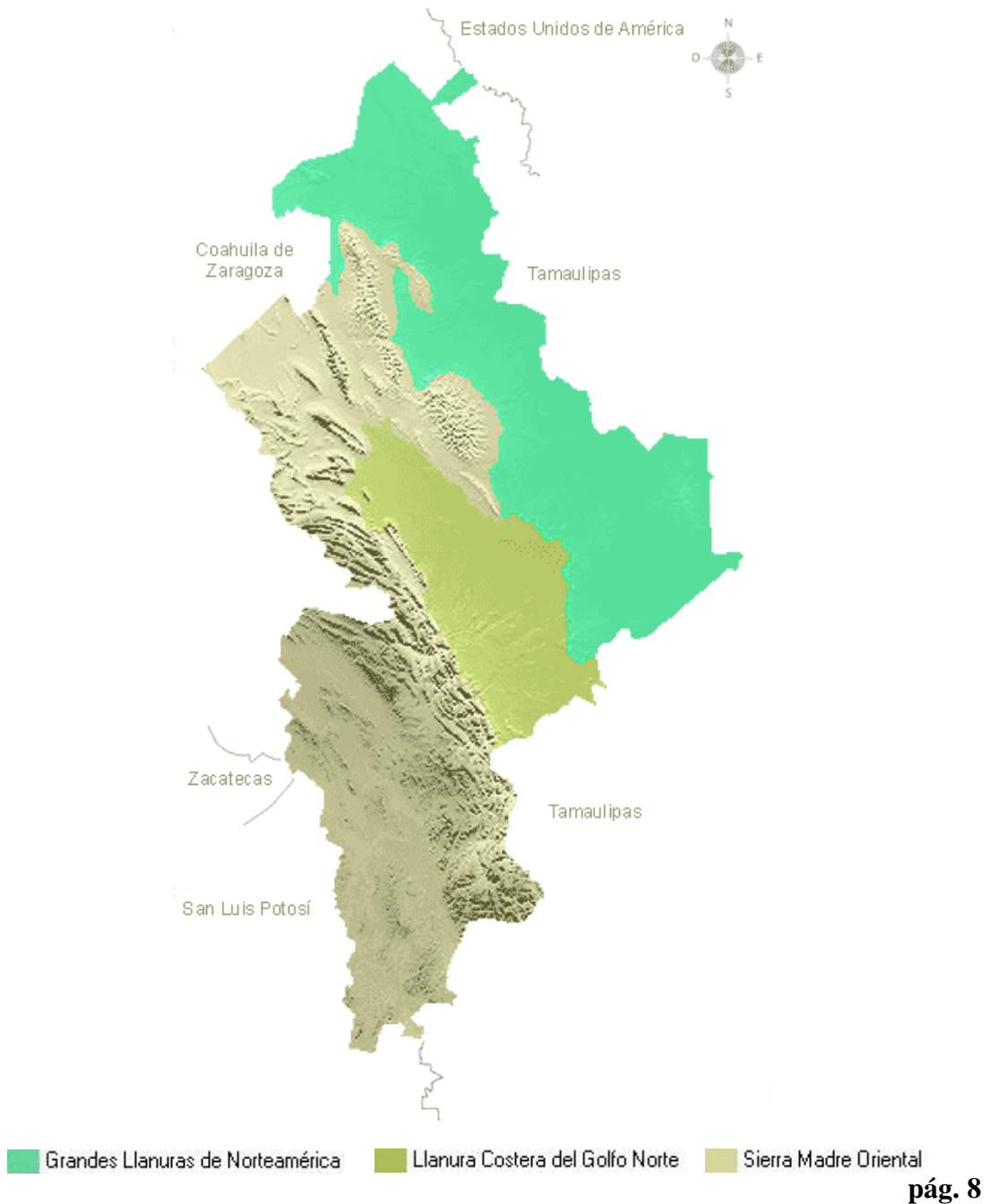


Figura 4 Provincias del estado de Nuevo León. Fuente: INEGI. Síntesis de información Geográfica del estado de Nuevo León. INEGI. Anuario Estadístico del estado de Nuevo León. INEGI. Continuo Nacional Topográfico S. II escala 1:250 000. INEGI.

### 2.3.2. Geología del lugar

La zona de estudio se encuentra dentro del Altiplano Central-Cadena Alta, se conforma por formaciones mesozoicas compuestas de calizas pelágicas con pedernal en la base presenta un nivel de yeso oxfordiano. La transgresión marina se manifiesta durante el oxfordiano en esta área.

En la sección al nivel de Aramberri, N. L. se reconoce la caliza Zuloaga-Inferior de edad oxfordiano este se encuentra cubierto de yesos, los cuales soportan a la caliza Zuloaga Superior y a las formaciones calcáreas del Jurásico Tardío-Neocomiano.

La parte central de la cuenca de Sandia el grande (Figura 5) se conforma de sedimentos aluviales pertenecientes al Cuaternario. Fuera de los límites de la cuenca podemos encontrar sedimentos lacustres, así como pequeños afloramientos conglomeráticos del Cuaternario. Del Terciario Inferior y Superior hay conglomerados distribuidos en la parte externa de la cuenca. El Cretácico está representado por calizas, lutitas e intercalaciones de calizas con lutitas y lutitas con areniscas. En la zona oriente colindante con la cuenca hay grandes afloramientos masivos que pertenecen al Cretácico Inferior. Las rocas correspondientes al Jurásico son calizas e intercalaciones de calizas con lutitas y yesos.

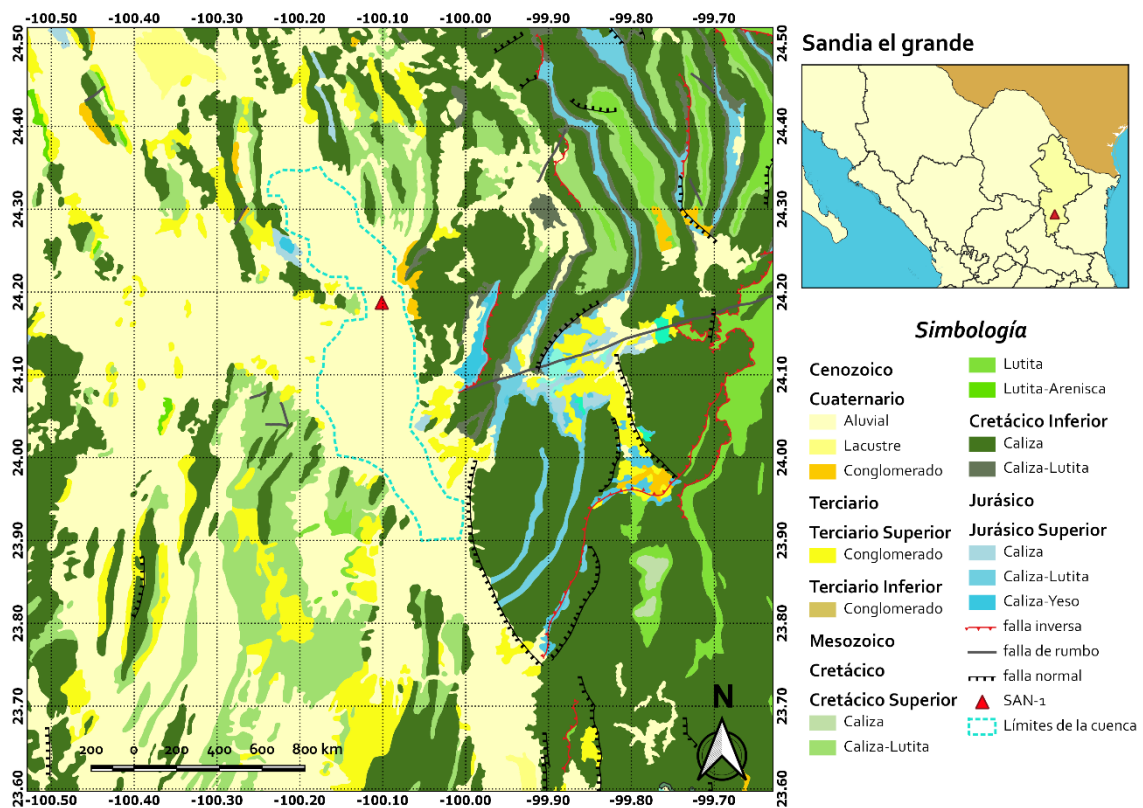


Figura 5 Geología de la zona de estudio, el triángulo rojo representa la ubicación de trinchera, la línea punteada azul corresponde a los límites de la cuenca (Adaptado de INEGI, febrero 2019).

#### 3.1. Fundamentos teóricos

##### 3.1.1. Propiedades eléctricas de las rocas

Es preciso definir la resistencia ( $R$ ) de un conductor alargado y homogéneo para poder definir a la resistividad eléctrica. La resistencia ( $R$ ) de un cuerpo será proporcional al camino que recorre la corriente eléctrica y no al volumen del cuerpo (ecuación 1.1, Orellana, 1974).

$$R = \rho \frac{l}{S} \dots (1.1)$$

Donde  $l$  es la arista,  $S$  es la sección y  $\rho$  es la resistividad.

$\rho$  representa la oposición del paso de la corriente al desplazarse en un material determinado. Las unidades de la resistividad eléctrica son el  $[\Omega \cdot m]$ . La conductividad eléctrica  $\sigma$  al contrario de la resistividad, refleja la facilidad con la que pasara la corriente a través de un material, sus unidades son  $[S/m]$ . Estos parámetros dependen de la naturaleza y del estado en que se encuentre el material a estudiar. En el caso de las rocas, hay diversos factores que afectan el comportamiento de esta magnitud física. Los materiales geológicos no deben considerarse sólo como un agregado solido de minerales, ya que también pueden contener una parte líquida y en algunos casos gaseosa. Es necesario tomar en cuenta todos los componentes de los depósitos sedimentarios (e. g. sedimento y rocas sedimentarias como lutita, arenisca etc.) para entender el comportamiento.

Los siguientes factores afectan la resistividad de los depósitos sedimentarios (Iakubovskii y Liajov, 1980):

- a) La resistividad de los minerales y constituyentes de la parte solida de la roca.
- b) La resistividad de los líquidos y gases presentes en los poros. Los líquidos están conformados de soluciones acuosas de diversas sales minerales en la mayoría de los casos, por lo que la resistividad está relacionada inversamente a la concentración de la sal en la disolución. La parte solida de la roca, en general, no es buena conductora como la solución contenida en poros. Por lo que la corriente eléctrica en la mayoría de los casos se desplaza por el electrolito
- c) Humedad o contenido de agua ( $H_2O$ ) presente en los minerales arcillosos.
- d) Textura del depósito sedimentario (tamaño de partículas, e.g. arcilla, limo, y arena)
- e) Porosidad y su distribución (permeabilidad)
- f) Procesos que ocurren en el contacto entre la fase líquida y fase solida de la roca. En la zona que separa a estos dos componentes ocurre el intercambio de iones y los que quedan adsorbido forman un revestimiento de una capa eléctrica binaria. Los iones restantes en la solución con signo opuesto forman una segunda capa. El líquido

contenido en los poros en los límites de esta capa tiene mayor concentración de iones. Se elevará el valor de la conductividad conforme el aumento de la extensión de esta capa.

Los portadores de cargas eléctricas que pueden ser iones o electrones controlan la conductividad. Por esto se le puede clasificar como iónica o electrónica (Figura 6).

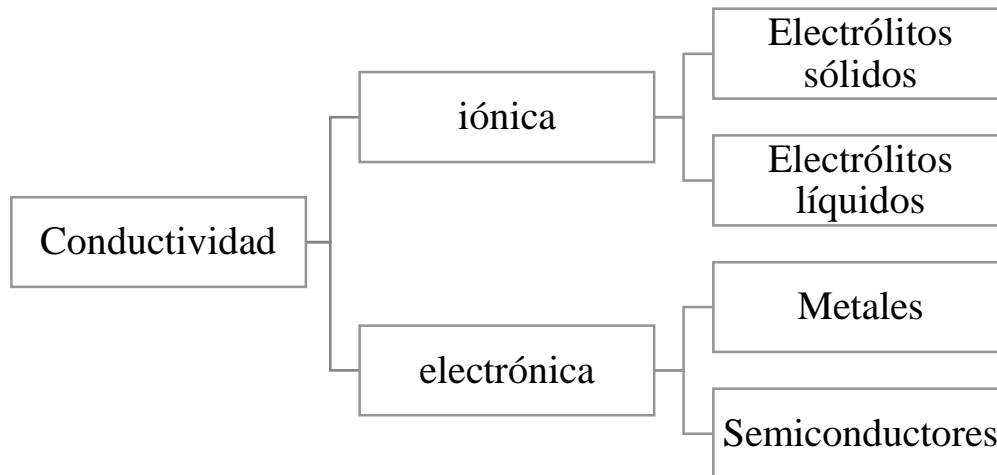


Figura 6 Diagrama esquemático que muestra la clasificación de la conductividad eléctrica en los materiales geológicos (Orellana, 1974).

Los metales son buenos conductores debido a su estructura molecular, ya que sus electrones de valencia pueden moverse libremente. Los iones positivos contenidos en este tipo de materiales viajan a través de un conducto que contiene una especie gas que los mantiene unidos. En los materiales semiconductores el cómo la corriente eléctrica viajará a través del material dependerá de la temperatura. Este tipo de materiales está compuesto por dos bandas energéticas separadas por una zona prohibida: *banda de valencia* y *banda de conducción*. Cuando el material alcanza una temperatura de 0 °C todos los electrones se encuentran en la banda de valencia, y no existe conductividad debido que los electrones no pueden desplazarse hacia la banda de conducción. Se le conoce la conductividad como *intrínseca* cuando la temperatura aplicada al material aumenta o si hay absorción de fotones. La conductividad *extrínseca* es aquella asociada a las impurezas del material.

Para los materiales dieléctricos o aisladores, los electrones están fuertemente ligados a los átomos con enlaces covalentes o iónicos (Orellana, 1974). Los minerales formados por enlaces iónicos se les considera como electrolitos sólidos. Los materiales dieléctricos no tienen la propiedad de conducir corriente debido a que la diferencia energética entre la banda de valencia y conducción es muy grande. Si se aumentara la temperatura en el material para llegar a la banda de conducción, dicho material llegaría al punto de fusión, imposibilitando la conductividad.

### 3.1.2. Ecuaciones generales

Las ecuaciones de Maxwell explican el comportamiento de los campos electromagnéticos, y por ende la física que hay detrás de estos métodos. En el caso de los métodos eléctricos estas ecuaciones permiten establecer la teoría de la técnica, así como

los parámetros que se han de utilizar. Las ecuaciones son las siguientes (Fitzpatrick, R. 2008):

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = q \quad (1.4)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (1.5)$$

Donde:

$\bar{H}$  = Campo magnético, [A/m]

$\bar{D}$  = Vector de desplazamiento eléctrico, [C/m<sup>2</sup>]

$\bar{B}$  = Vector de inducción magnética, [Wb/m<sup>2</sup>]

$\bar{J}$  = Vector de densidad de corriente [A/m<sup>2</sup>]

$q$  = densidad de carga eléctrica, [C/m<sup>3</sup>]

$\bar{E}$  = Campo eléctrico, [V/m]

### 3.2. Campo eléctrico

Se requiere una fuente de corriente (generador) conectada al medio utilizando cables o dos electrodos (“A” y “B”), para generar un campo eléctrico. Estos dispositivos al estar muy cercanos al suelo se les puede considerar parte del medio, para ejemplificar esto se considerará a un medio compuesto por un semiespacio homogéneo con resistividad  $\rho$  y la atmosfera. El voltaje que se genera entre A y B provocará que la corriente se trasmite de A hasta B, con una corriente  $I_B$  (Figura 7) de tal manera que esta volverá al generador cerrando el circuito. Para este tipo de medios se considera al campo eléctrico como estacionario, por lo que las derivadas temporales de las ecuaciones de Maxwell (ecuaciones 1.2, 1.3) se anulan quedando como (Orellana, 1974):

$$\nabla \times E = 0 \quad \dots \quad (1.6)$$

$$\nabla \times H = J \quad \dots \quad (1.7)$$

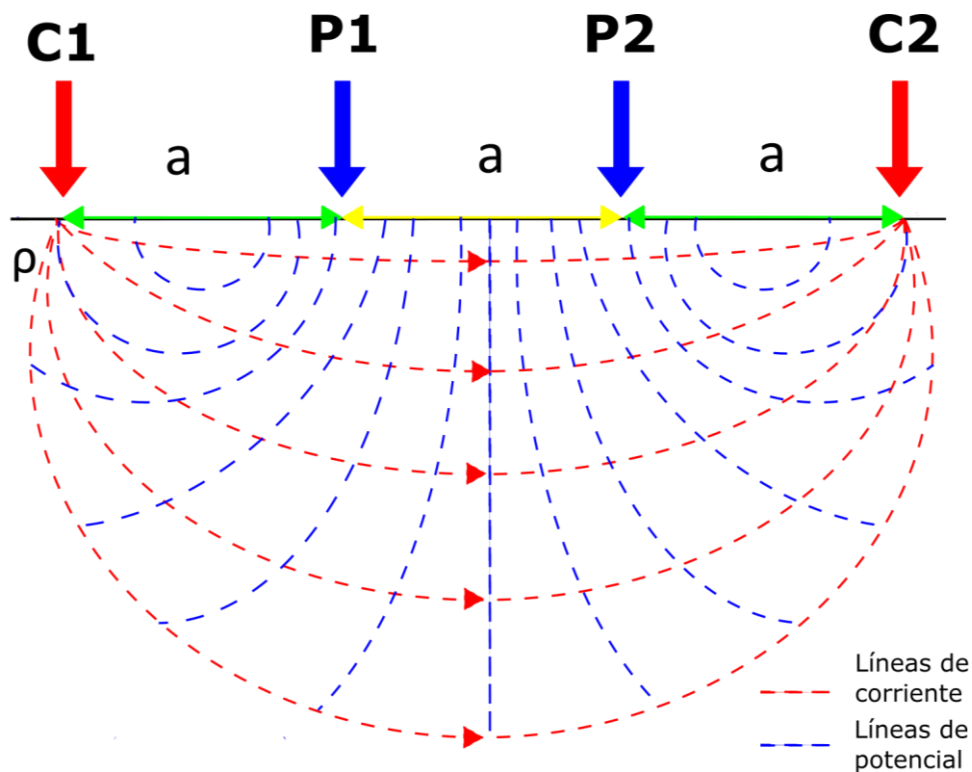


Figura 7 Líneas de corriente y potencial de dos tomas de corriente en un medio homogéneo.

Las ecuaciones 1.6 y 1.7 indican que el campo  $\mathbf{E}$  es conservativo e irrotacional, por lo que deriva de un potencial escalar  $U$  (Orellana, 1974).

$$E = -\nabla U \quad \dots \quad (1.8)$$

Otra consideración que debe realizarse es la ley de Ohm para medios isótropos. La densidad de corriente tendrá la misma dirección y el sentido que el campo  $E$  en el mismo punto y será proporcional a este.

$$J = \sigma E \quad \dots \quad (1.9)$$

Se debe cumplir la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot J = 0 \quad \dots \quad (1.10)$$

La ecuación 1.10 se verá reducida ya que esta no varía con el tiempo

$$\nabla \cdot J = 0 \quad \dots \quad (1.11)$$

En todos los puntos excepto en los electrodos, combinando 1.9 en 1.11 se obtiene

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (\sigma E) = 0 \quad \dots \quad (1.12)$$

Aplicando algebra en la ecuación 1.12, la ecuación general de la prospección eléctrica es

$$\begin{aligned}\nabla \cdot (\sigma E) &= \sigma \cdot \nabla \cdot E + E \cdot \nabla \cdot \sigma = -\sigma \nabla \cdot \nabla U + E \cdot \sigma \nabla = -\sigma \nabla^2 U + E \cdot \nabla \sigma \\ &= 0 \quad \dots \quad (1.13)\end{aligned}$$

En las zonas donde la conductividad sea uniforme  $\nabla \sigma = \mathbf{0}$  reduciendo la ecuación 1.13 a

$$\nabla^2 U = 0 \quad \dots \quad (1.14)$$

Siendo esta la ecuación de Laplace, esta se cumple en todo el semiespacio a excepción de los electrodos ni en las superficies discontinuas.

El campo  $\mathbf{E}$  de un electrodo puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia  $\mathbf{r}$  (ecuación 1.15).

$$|E| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^3} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad \dots \quad (1.15)$$

Se puede clasificar a los métodos geoelectricos a partir del campo electromagnético que genere la medición en la prospección. Dicho campo, puede ser de origen artificial o natural, tal y como se muestra a continuación:

- I. Campo Natural
  - Potencial espontaneo
  - Corrientes telúricas
  - Magnetotelúrico
  - AFMAG
- II. Campo Artificial
  - a. Campo Artificial de campo constante
    - Líneas equipotenciales y del cuerpo cargado
    - Sondeos Eléctricos
    - Calicatas Eléctricas
    - Medición magnética de resistividad
  - b. Campo Variable
    - Sondeos de frecuencia
    - Sondeos por establecimiento de campos (transitorios)
    - Calicatas electromagnéticas
  - c. Polarización Inducida

El objetivo de los métodos eléctricos cuya fuente es un campo artificial constante tienen como finalidad el encontrar el comportamiento de la resistividad eléctrica haciendo mediciones en un medio determinado. Esta fuente se conecta al subsuelo utilizando al menos cuatro electrodos. Es posible determinar la resistividad aparente del subsuelo teniendo al conocimiento de la corriente inyectada y de la medición del potencial eléctrico entre los electrodos.

Una manera de clasificar los métodos de prospección geofísica es a partir de la respuesta que generará al medio. Los métodos pasivos son aquellos que miden la variación de las propiedades físicas del subsuelo. Por otro lado, se considera a un método activo cuando se produce una alteración del subsuelo y se mide la respuesta. Las mediciones de resistividad eléctrica en el terreno se basarán en el contraste de esta propiedad entre el

medio y el material a caracterizar, por lo que los métodos eléctricos también se pueden considerar como activos.

### 3.3. Diferencia de Potencial entre dos electrodos M y N

El camino de integración es indiferente ya que el campo eléctrico es conservativo.

$$U_N^M = - \int_N^M E \cdot dl = - \frac{I\rho}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \dots \quad (1.16)$$

Aplicando el limite cuando  $r_2 \rightarrow \infty$ , el segundo miembro de la ecuación se considerará 0 y se llega a una expresión que representa la diferencia de potencial para un medio homogéneo e isótropo (ecuación 1.16).

$$U_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} * \frac{1}{r} \dots \quad (1.17)$$

El potencial es continuo, no sufre cambios al pasar de un medio a otro. Por otro lado, las líneas de corriente y equipotenciales sufren refracción al pasar de un medio a otro.

### 3.4. Resistividad Aparente

En un medio homogéneo con resistividad ( $\rho$ ), el electrodo A esta conectado a un generador de corriente, el electrodo B se coloca en el infinito, el campo eléctrico generado por A-B se mide a través de los electrodos M-N a partir de la diferencia de potencial generado entre estos (Figura 8).

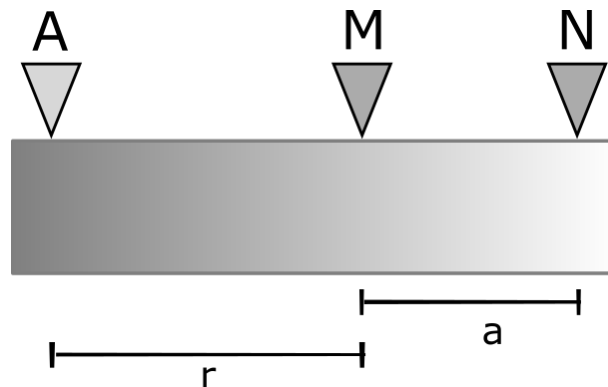


Figura 8 Distribución de los electrodos en un medio homogéneo.

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{a}{r(r+a)} \dots \quad (1.18)$$

Despejando a ( $\rho$ ) se obtiene la fórmula para calcular la resistividad para un subsuelo homogéneo (ecuación 1.19).

$$\rho = 2\pi \frac{r(r+a)}{a} \frac{\nabla V}{I} \dots \quad (1.19)$$



Sin embargo, difícilmente se presenta en la naturaleza un medio con dichas características, por lo que si se considera a un medio no homogéneo con distintas resistividades (Figura 9). Al aplicar la ecuación 1.19 se obtendrá una resistividad ( $\rho_a$ ) la cual dependerá de todas las resistividades del medio y de la distancia entre electrodos (Orellana, 1974), a este parámetro se le conoce como resistividad aparente.

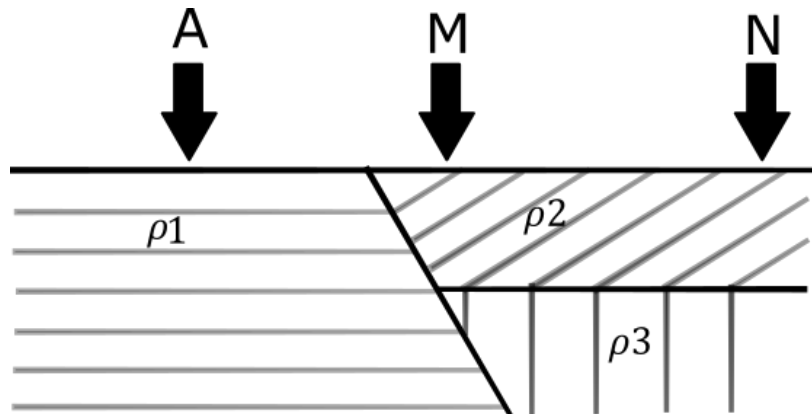


Figura 9 Medio heterogéneo con diferentes resistividades.

### 3.5. Dispositivo electródico

Al implementar técnicas como el sondeo eléctrico vertical (SEV) o la Tomografía de resistividad eléctrica (TRE) se utilizan configuraciones o dispositivos electródicos. En general, estos constan de cuatro electrodos (Figura 10) donde la corriente entra y sale por los electrodos A-B (C1-C2), mientras que M-N (P1-P2) se conectan a un instrumento que mide la diferencia de potencial entre estos.

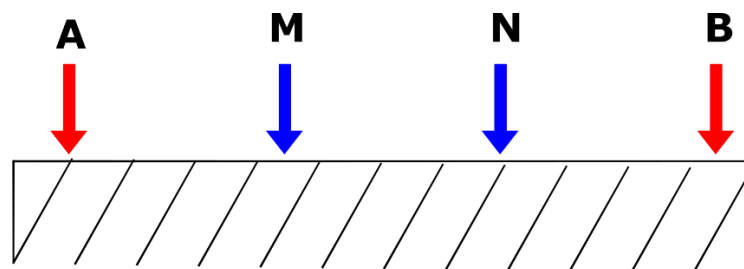


Figura 10 Dispositivo electródico con electrodos de corriente A-B y electrodos de potencial M-N.

Los electrodos pueden adoptar cualquier disposición geométrica sobre el plano que representa la superficie del terreno. Para cualquier dispositivo, si se conocen las distancias entre electrodos, el valor de la corriente inyectada ( $I$ ) y la diferencia de potencial entre M-N ( $\Delta V$ ) se podrá obtener la resistividad aparente (ecuación 1.20).

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \dots (1.20)$$

Donde  $k$  es el coeficiente o factor geométrico, el cual depende del dispositivo electródico que se utilice. Esta constante está relacionada con la señal del potencial medido, es decir,

es inversamente proporcional al factor geométrico usado para calcular el valor de la resistividad aparente.

La diferencia de potencial utilizando cuatro electrodos estará dada por la ecuación 1.21, tomando en cuenta la distancia entre cada uno de los electrodos.

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \dots \quad (1.21)$$

Para obtener la resistividad aparente  $\rho_a$  se despeja a la ecuación 1.21, quedando como

$$\rho_a = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \frac{\Delta V}{I} \dots \quad (1.22)$$

El factor geométrico estará dado por

$$k = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \dots \quad (1.23)$$

### 3.5.1. Arreglos electródicos comunes

#### 3.5.1.1. Arreglo Wenner

El arreglo Wenner consta de 4 electrodos y puede tener tres variaciones que son: Wenner-Alpha, Wenner-Beta y Wenner-Gamma (Figura 11). La diferencia entre estos es el acomodo de los electrodos, el arreglo más utilizado es el arreglo Wenner Alpha. La diferencia entre estos es el acomodo de los electrodos. Este tipo de arreglo es relativamente sensible a cambios verticales en la resistividad del subsuelo por debajo del centro del arreglo. Sin embargo, la sensibilidad es baja a cambios horizontales, es decir, su capacidad de detectar estructuras verticales es pobre. Por otro lado, es bueno detectando estructuras horizontales. Tiene una profundidad moderada de investigación comparado con otros arreglos. También cuenta con mayor fuerza de señal comparado con otros dispositivos electródicos. Esto ayuda en el estudio de una zona rodeada de ruido. Una desventaja de este arreglo es que tiene una pobre cobertura horizontal conforme el espaciamiento entre los electrodos aumenta (Loke, 2015).

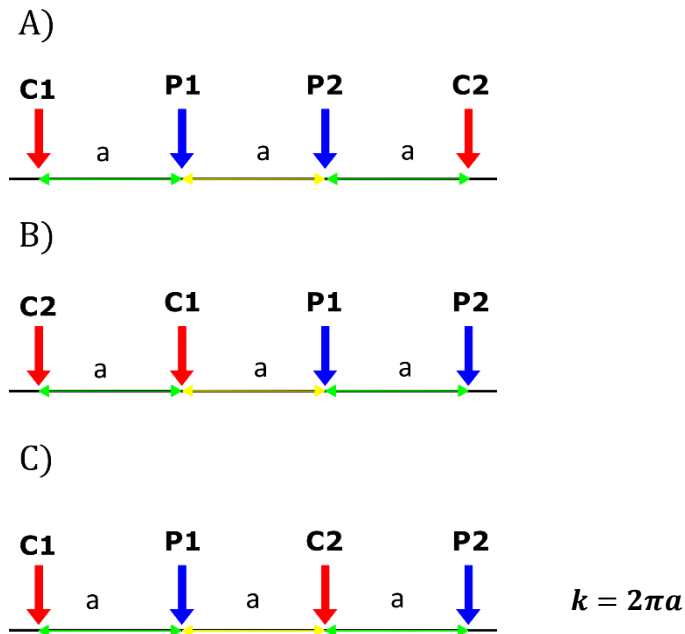


Figura 11 Variaciones en la disposición de los electrodos para el arreglo Wenner; A) Wenner Alpha, B) Wenner Beta y C) Wenner Gamma.

### 3.5.1.2. Arreglo Dipolo-Dipolo

En el arreglo la distancia “a” entre los electrodos de corriente (A-B o C1-C2) y los de potencia (M-N o P1-P2) será igual. En este arreglo interviene un nuevo parámetro denominado “n” el cual representa al radio de la distancia C1-P1 a la longitud del dipolo C2-C1 o P1-P2 (Figura 12). Las zonas con mayor sensibilidad a cambios de resistividad se encuentran por debajo de los pares de dipolos (C2-C1 y P1-P2).

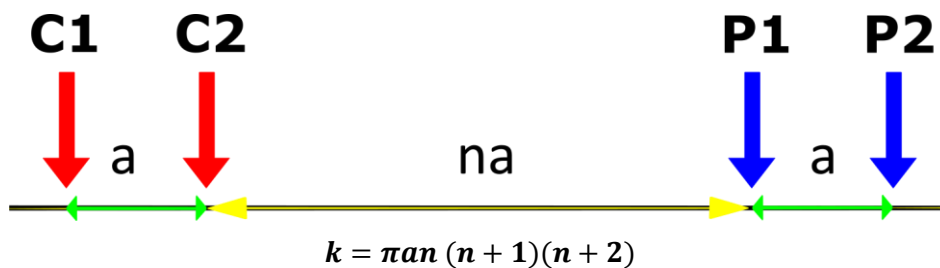


Figura 12 Disposición de los electrodos para el arreglo Dipolo-Dipolo.

La distancia “a” se mantiene fija y se utiliza un espaciado mínimo. El factor “n” incrementa de 1 en 1 hasta llegar a 6 para aumentar la profundidad media de investigación. La señal que alcanza este arreglo es pequeña para valores grandes de n.

Este arreglo tiene una mejor cobertura horizontal que el arreglo Wenner para los sondeos en 2D. Es decir, se detectan estructuras verticales como cuevas, muros, plumas contaminantes. Por otro lado, el dispositivo dipolo-dipolo no resulta eficiente detectando estructuras horizontales como capas sedimentarias (Loke, 2015).

### 3.5.1.3. Arreglo Wenner-Schlumberger

El factor “n” es el radio de la distancia entre C1-P1 o P2-C2 al espaciamiento entre el par de electrodos de potencial P1-P2 para el arreglo Wenner-Schlumberger (Figura 13).

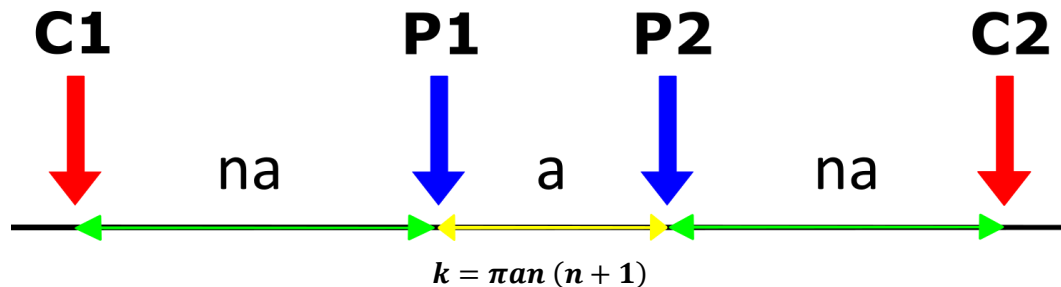


Figura 13 Disposición de los electrodos para el arreglo Wenner-Schlumberger.

La sensibilidad de este arreglo electródico aumentara conforme el factor “n” lo haga (n=1 para el arreglo Wenner a 6 para el arreglo clásico de Schlumberger). El área con mayor sensibilidad se sitúa por debajo de los electrodos de potencial. Este dispositivo electródico tiene una susceptibilidad moderada para detectar estructuras horizontales y verticales. La profundidad media de investigación tiene mayor alcance (10%) comparando con el arreglo Wenner, utilizando la misma distancia entre los electrodos C1-C2. La cobertura horizontal registrada usando este arreglo será ligeramente mejor que la obtenida usando el arreglo Wenner, pero será menor a la cubierta por el arreglo Dipolo-Dipolo. Al realizar la adquisición de los datos con el arreglo Wenner- Schlumberger se perderán menos datos conforme el nivel de profundidad aumenta (2 puntos/nivel). En el caso del arreglo Wenner la perdida de datos es de 3 puntos por nivel (Loke, 2015).

## 3.6. Sondeos en 1D, 2D y 3D

### 3.6.1. Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) o 1D.

En esta técnica el centro del arreglo del electrodo es fijo, en cambio la distancia o espaciamiento entre electrodos va en aumento (para obtener información sobre lugares más profundos del subsuelo). Al implementar este sondeo se considera que el suelo se comporta como una serie de capas horizontales homogéneas e isótropas. Los cambios de resistividad solo se detectan verticalmente (Figura 14). La limitación de este método radica en que las variaciones de resistividad se dan lateralmente o bien cuando los cambios se dan entre distancias cortas debido a las variaciones geológicas presentes en el área de estudio harán que el sondeo no será capaz de detectarlo.

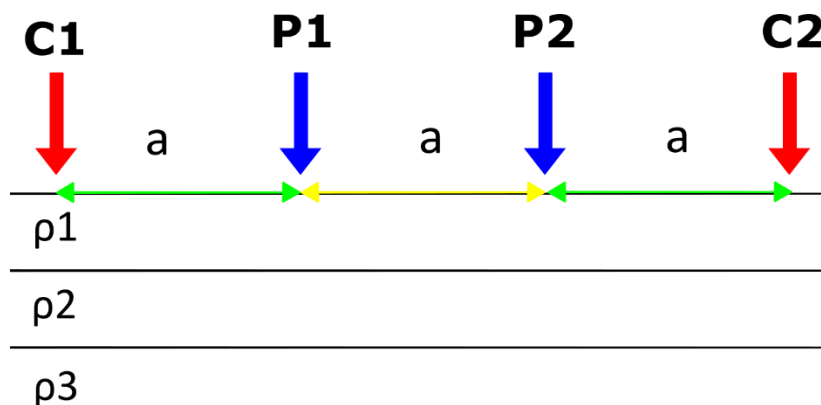


Figura 14 Diagrama esquemático de un modelo 1D para 3 capas

### 3.6.2. Calicatas eléctricas

Las calicatas eléctricas se utilizan para conocer la variación lateral de la resistividad eléctrica del subsuelo. Para esta técnica la toma de tierra que alimenta y la que mide son invariantes. El dispositivo o arreglo se desplaza de una medición a otra en una dirección, lo que permite observar un perfil geoeléctrico a lo largo de la línea de observación (Iakubovskii y Liajov, 1980).

### 3.6.3. Sondeos eléctricos en 2D o tomografía de resistividad eléctrica (TRE)

Esta técnica de adquisición de datos toma en cuenta las variaciones de resistividad en dirección horizontal como vertical a lo largo de la línea de tendido. La resistividad en dirección perpendicular a la línea de tendido no varía. Las mediciones se hacen usando un número grande de electrodos (más de 25) conectados a un cable multinúcleo. Una microcomputadora junto a un conector electródico selecciona automáticamente los cuatro electrodos correspondientes a cada medida. La distancia o separación entre electrodos suele ser constante.

Para la primera secuencia o toma de medida “n” será el nivel de medición, comenzando en el nivel 1. La siguiente secuencia se hará con un espaciamiento entre electrodos de  $2a$ . Los primeros electrodos 1,3,5 y 7 son los elegidos para hacer la medición. El proceso se repetirá con una distancia entre electrodos (Figura 15) de  $3a$ ,  $4a$ ,  $5a$ ,  $6a$ . A medida que la separación entre electrodos aumenta, el número de mediciones disminuye. La cantidad de datos que pueden obtenerse para cada espaciamiento entre electrodos considerando cierto número de electrodos dependerá de la configuración electródica que se utilice (Loke, 2004).

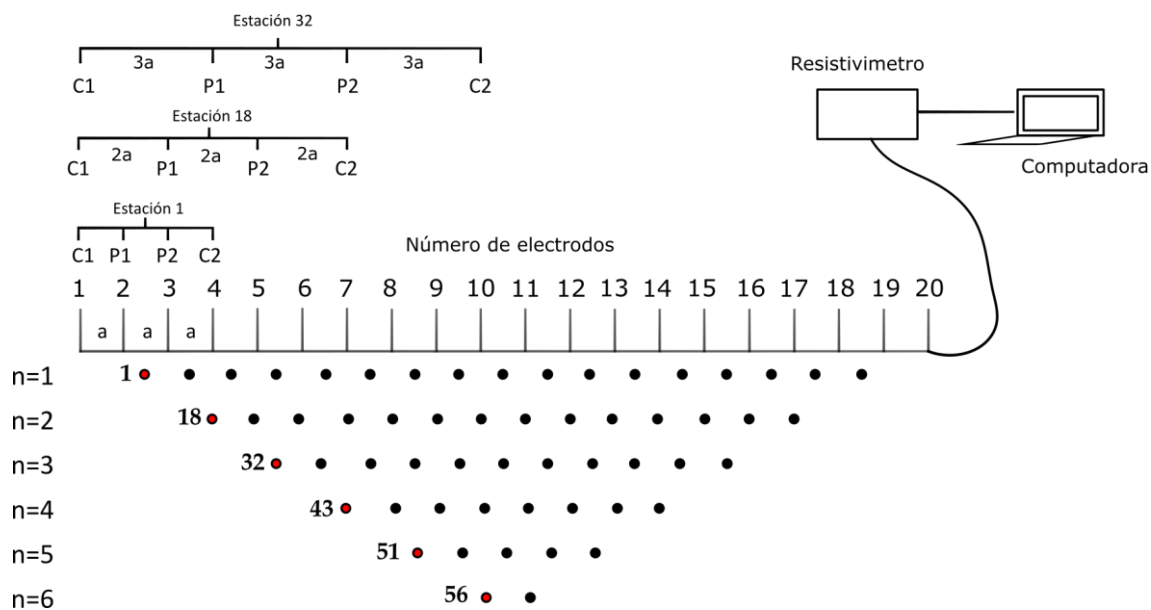


Figura 15 Diagrama esquemático de un modelo de sondeo 2D para una línea de 20 electrodos (Adaptado de Loke y Barker, 1995).

### 3.6.4. Sondeos en 3D

Las investigaciones para el avance de levantamientos geoelectricos en 3D sigue en desarrollo. Este tipo de técnica resulta conveniente debido a que todas las estructuras geológicas presentes en la naturaleza son tridimensionales. Dos de sus ventajas radica en que los resistivímetros multicanal son capaces de tomar más de una lectura simultáneamente y las computadoras actuales son capaces de realizar la inversión de un gran número de datos, lo que permite optimizar el tiempo. Sin embargo, los sondeos en 3D resultan más costosos en comparación con los 2D (Loke, 2004).

Las configuraciones electródicas utilizadas para este tipo de sondeo son Polo-Polo, Polo-Dipolo y Dipolo-Dipolo, ya que los otros dispositivos o arreglos electródicos no cubren eficazmente los bordes de la malla que se está estudiando.

La adquisición de datos generalmente se hace en una malla o grilla cuadrada, cuyo espaciamiento entre electrodos en dirección “X” y “Y” es constante. Si se requiere mapear cuerpos largos se puede usar una grilla rectangular con diferente número de electrodos y la distancia entre electrodos puede variar tanto en dirección “X” como “Y”.

### 3.7. Profundidad de investigación

En los trabajos de exploración geofísica donde se utilicen métodos eléctricos como el sondeo eléctrico vertical (SEV) o la tomografía de resistividad eléctrica (TRE) la profundidad que puede alcanzar dependerá del tipo de arreglo a utilizar, así como de la distancia o separación entre electrodos. Ya que al aumentar la distancia que tendrá un electrodo con respecto al otro, la profundidad sondeada será mayor.

Una alternativa para entender que es la profundidad de investigación es a partir de la integración de la función de sensibilidad para una capa horizontal que se enuncia como:

$$F_{ID}(z) = \frac{2}{\pi} \frac{z}{(a^2 + 4z^2)^{1.5}} \quad (1.24)$$

Esta ecuación se le conoce como característica de la profundidad de investigación, la Figura 16 se puede observar el comportamiento de dicha ecuación para el arreglo Wenner y Dipolo-Dipolo (Loke, 2004).

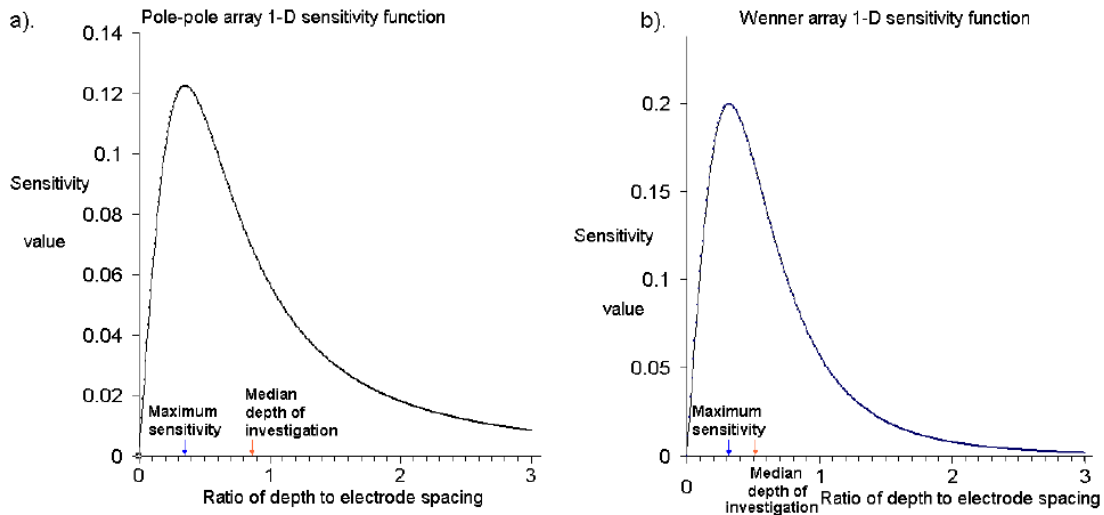


Figura 16 Gráficos de la función de sensibilidad para los arreglos Wenner y Polo-Polo (Loke, 2015).

(Edwards, 1977) y (Barker, 1991) definieron la profundidad media de investigación como la profundidad a la cual el área por debajo de la curva es igual a la mitad del área total. Esta no dependerá de la resistividad aparente medida. En la tabla 1 se muestran las profundidades de investigación para el arreglo Wenner y Dipolo-Dipolo establecidos por dos autores (Roy, 1971; Barker, 1989). Estos valores indican que para el arreglo Wenner la profundidad máxima detectada será entre una sexta y novena parte de la longitud total del tendido. Por otro lado, en el caso del arreglo Dipolo-Dipolo la profundidad de penetración abarcará la cuarta parte de la longitud total del tendido.

Tabla 1 Valores de la profundidad de investigación para los dispositivos electrónicos Dipolo-Dipolo y Wenner (Adaptado de Temer y Cherchali, 2018).

Dispositivo Electrónico		Profundidad de investigación	
		(Roy, 1971)	(Barker, 1989)
Wenner		0.11L	0.17L
Dipolo-Dipolo		0.195L	0.25L

## CAPITULO 4

### Material y Métodos

#### 4.1. Adquisición de datos

La adquisición de datos para este trabajo está dividido en dos partes; el trabajo de campo y el trabajo laboratorio. De la misma forma, el trabajo realizado en campo se realizó utilizando dos diferentes metodologías. La observación y descripción de las características texturales del subsuelo en la zona de estudio se obtuvo mediante la observación geológica, para esto se hizo una trinchera. La respuesta de la resistividad eléctrica en el subsuelo se analizó mediante la tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) cerca de la zona de estudio para encontrar la correlación entre ambas características.



*Figura 17 Fotografía de los sedimentos expuestos en la trinchera SAN-1 con una profundidad de 300 cm en la cuenca SANDIA.*

##### 4.1.1. Trabajo de campo

El trabajo de campo consiste en la observación y descripción de la textura y estructuras primarias en los sedimentos depositados en la cuenca Sandia durante el Cuaternario tardío. Se realizó una trinchera denominada SAN-1 en un sitio dentro de la cuenca sedimentaria con las coordenadas  $24^{\circ} 11' 13.6''$  norte y  $100^{\circ} 06' 4.4''$  oeste (Figura 17). La profundidad máxima de la trinchera es de 300 cm y el muestreo de ésta se realizó cada 2 cm, obteniendo un total de 150 muestras. Todas las muestras fueron empaquetadas en bolsas herméticas y rotuladas individualmente para su posterior análisis. A su vez los



sedimentos expuestos en la trinchera fueron descritos estratigráficamente basándose en la textura de los sedimentos, su composición mineralógica, presencia de estructuras sedimentarias y coloración.

#### 4.1.2. Tomografía de resistividad eléctrica (TRE)

La tomografía de resistividad eléctrica (TRE) se realizó cerca de la trinchera, aproximadamente en una distancia de 5 metros (Figura 18). Los datos se adquirieron utilizando el resistímetro SYSCAL PRO Switch 48 de la marca Iris Instrument (Figura 19) y se utilizaron tres diferentes arreglos electródicos: Dipolo-Dipolo, Wenner y Wenner-Schlumberger. Se decidió utilizar el arreglo dipolo- dipolo para tener una perspectiva acerca de los cambios en la resistividad eléctrica producidos por estructuras verticales y horizontales en la zona. A su vez, al tratarse de un área con sedimentos dispuestos en capas, los arreglos Wenner y Wenner-Schlumberger son los que mejores resultados obtienen debido a su resolución. Las tres tomografías se hicieron sobre la misma línea paralela a la trinchera, con una longitud total de 47 m, se usaron barras de cobre con una separación interelectródica de 1 metro.



Figura 18 Ubicación de la trinchera y la línea de tomografía eléctrica (Imagen modificada de Google Earth, 2019)

Se programó el equipo indicando todas las características para la toma de datos, es decir el tipo de arreglo a utilizar, el espacio entre electrodos y los parámetros de calidad.



*Figura 19 Resistivimetro SYSCAL Pro Switch 48 de Iris Instrument utilizado para la tomografía de resistividad eléctrica de los sedimentos en la Cuenca Sandia.*

#### **4.2. Trabajo de Laboratorio**

Las muestras obtenidas en campo fueron trasladadas al laboratorio de Paleoambientes y Paleoclimas del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), para hacerles diversos análisis geoquímicos. Antes de realizar algún análisis, todas las muestras fueron pesadas individualmente y posteriormente fueron colocadas en vasos de precipitado rotulados para secarlas a una temperatura de 50° C durante un día. Una vez secas, aproximadamente 10 g de cada muestra se muele manualmente en un mortero de ágata (Figura 20) con la finalidad de que la muestra consiga un tamaño homogéneo ( $< 4 \mu\text{m}$ ). Por último, las muestras molidas fueron colocadas en bolsas herméticas rotuladas para su conservación en un refrigerador con una temperatura menor a los 2 °C para evitar proliferación de hongos.



*Figura 20 Mortero de ágata utilizado para moler las muestras obtenidas en la cuenca de Sandia.*

Parte fundamental de los estudios de paleoambientes y paleoclimas se enfoca en la obtención de la edad de los sedimentos recolectados en campo. En este trabajo se eligió una muestra en la base del perfil sedimentario expuesto en la trinchera correspondiente a la profundidad 262-264 cm para el análisis de radiocarbono usando el método de espectrometría de masas con acelerador (AMS, por sus siglas en inglés). El análisis de radiocarbono se llevó a cabo en el laboratorio comercial International Chemical Analysis localizado en Miami, Florida, EUA. La fecha obtenida fue calibrada o convertida a fechas calendario usando el programa CALIB 7.1 (Sturve & Reimer, 1993).

#### **4.3. Concentración de análisis de elementos mayores y trazas**

Para conocer la concentración química elemental se analizaron 150 muestras utilizando el método analítico fluorescencia de rayos X (FRX). Este método consiste en medir la energía emitida por una sustancia al ser expuesta a un haz de rayos X. Cuando un rayo X actúa sobre la muestra, esta expulsa los electrones de las capas más internas de sus elementos, los iones liberados son inestables entonces las capas suelen ser llenadas por otros electrones. Cada elemento tendrá un espectro característico que será medido en función de la longitud de onda del efecto producido por un electrón al saltar de un nivel de mayor o menor energía. Una de las ventajas de este método es que no destruye la muestra, por lo que posteriormente esta se puede reutilizar para otros análisis.

Se utilizó el equipo NITON FXL 950 de la marca Thermo Scientific (Figura 21). El equipo consta de tres partes: la fuente que genera los rayos X, en este caso un tubo de 50 kV elaborado con Ag, un detector geométrico optimizado (GOLDD), cuya función es transformar la respuesta que tuvo el material ante la excitación del haz de rayos X a una señal eléctrica que se pueda medir. Una unidad de procesamiento que registra la señal calculando así la concentración de elementos como Cl y S presentes en la muestra. Este difractómetro puede analizar muestras usando 3 modos. Estos modos son: Soil mode, mining Cu/Zn y Mining Ta/H. La diferencia entre cada uno de estos es la sensibilidad a los rangos de diferentes elementos. A su vez, cada modo consta de 3 filtros (main, high y low). El análisis de medición por muestra tiene una duración de 240 s.



*Figura 21 Difractómetro portátil NITON FXL 950 de la marca Thermo Scientific utilizado para el análisis de elementos mayores y trazas.*

Para realizar este análisis se preparará cada una de las muestras individualmente en un contenedor cilíndrico de plástico, donde una de sus tapas es una película de propileno de TF-240-255 de 4  $\mu\text{m}$  de espesor. Dentro de este cilindro se colocan de 10 y 12 g de la muestra cubriendo la película de propileno en su totalidad, posteriormente se coloca un filtro de papel, se rellena con material de algodón, se tapa y etiqueta (Figura 22).

Para conocer la concentración de los elementos mayores presentes en la muestra se utilizó el modo Mina Cu/Zn. Este modo o protocolo detecta los siguientes elementos: Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, K, P, Rb, Sr y Zr, además de metales ligeros. Antes de iniciar el proceso se mide un estándar (USGS SaAR-M2) el cual contiene con suelos ricos en metales elaborado por la USGS, por sus siglas en inglés (The United States Geological Survey). Este proceso se repite después de la medición de 10 muestras. Estos datos se calibran con una ecuación para cada elemento, esto con la finalidad de mejorar la precisión de las concentraciones.

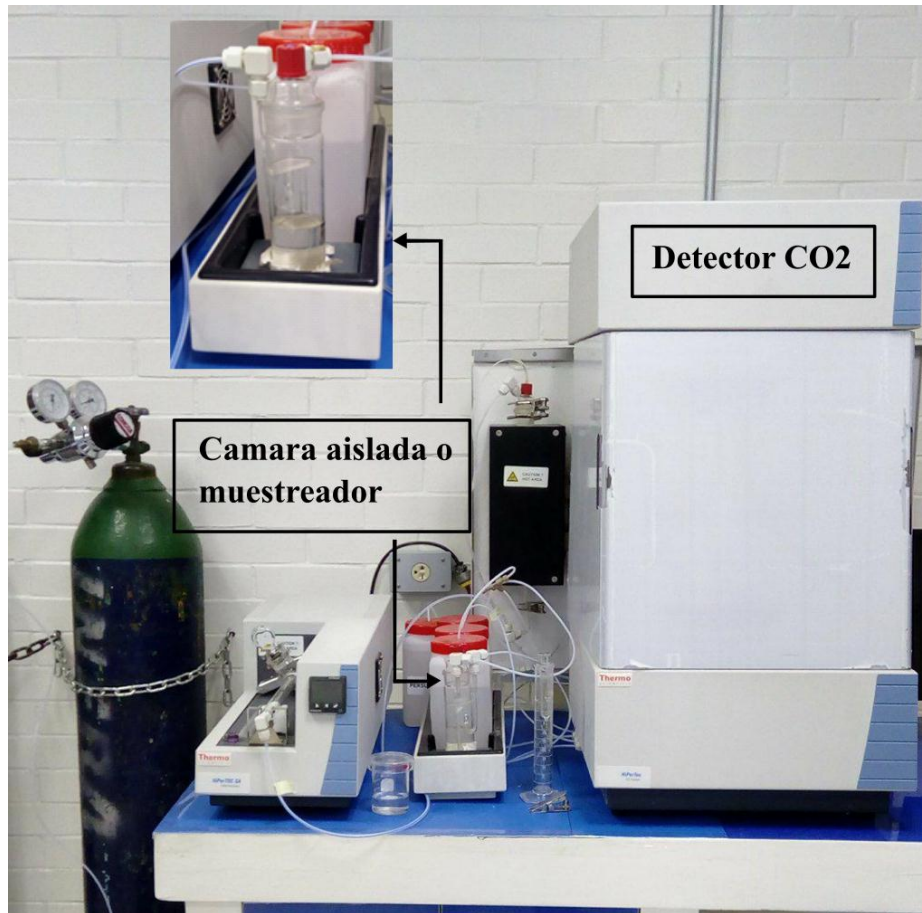


*Figura 22 Muestras de la cuenca Sandia empaquetadas para el análisis de fluorescencia de rayos X.*

#### **4.4. Análisis de Carbono Inorgánico Total (TIC)**

Este procedimiento se llevó a cabo utilizando el equipo Thermo Scientific HiperTOC (Figura 23). El equipo consta de un muestreador o cámara y de un sensor; a su vez esta se conecta a un tanque de gas. La estimación de TIC se realiza colocando entre 8 y 12 mg de la muestra molida en capsulas de cuarzo. La muestra se colocó dentro de una cámara aislada de vidrio. Durante los primeros 15 s el oxígeno que fluye dentro de la zona aislada permite que el dióxido de carbono que pudo introducirse del medio se elimine. Posteriormente, se aplica ácido fosfórico al 10% con una jeringa, provocando que los carbonatos contenidos en la muestra se liberen como dióxido de carbono ( $CO_2$ ). La cámara al estar aislada y ayudándose del flujo de oxígeno dirige el  $CO_2$  liberado hacia el sensor infrarrojo para la medición. Se estima la concentración de carbono inorgánico total en porcentaje, a partir de una relación entre la masa medida y la cantidad de dióxido de carbono liberado por cada muestra.





*Figura 23 Equipo Thermo Scientific HiperTOC utilizado para medir la concentración de Carbono Inorgánico Total (TIC) en las muestras de la cuenca Sandia.*

5.1. Resultados geológicos y geoquímicos

5.1.1. Textura de los sedimentos

La trinchera (SAN-1) está compuesta por tres unidades con diferentes características texturales. La división de la columna de 300 cm de profundidad se hizo basándose en los cambios de textura, color y presencia de estructuras primarias presentes en los sedimentos. El centímetro cero corresponde a la parte más somera de trinchera y el centímetro trescientos a la parte más profunda (Figura 24).

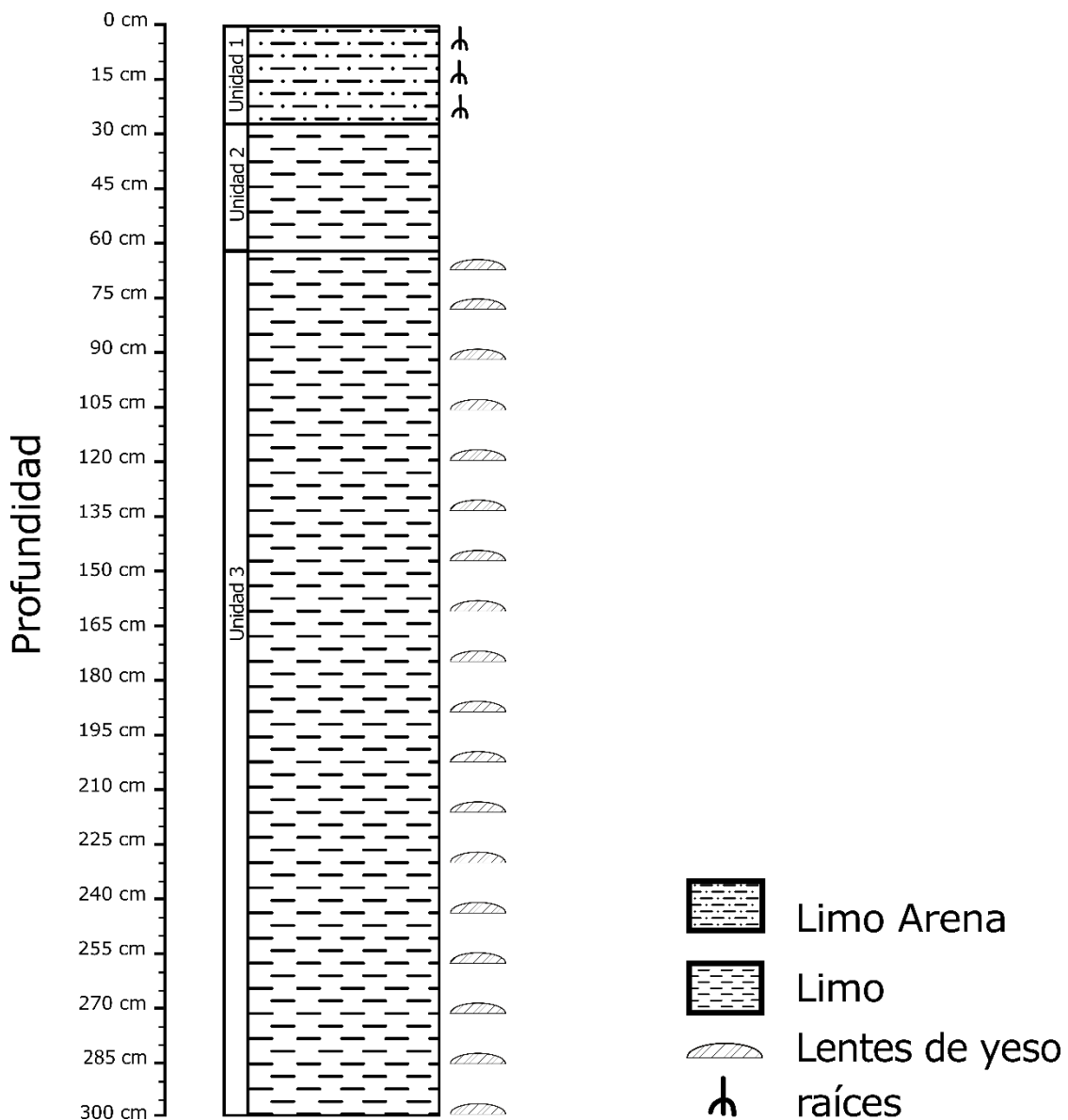


Figura 24 Textura de los sedimentos del perfil sedimentario de la cuenca Sandia expuesta en la trinchera con profundidad de 300 cm.

La columna se dividió de la siguiente manera, donde **nm** es el número de muestras por unidad:

La unidad 1 (27-0 cm, nm: 14): Es la unidad más superficial y está compuesta de limo-arena con fragmentos de roca con tamaño de arena gruesa. Los sedimentos de esta unidad tienen color café y cuentan con presencia de restos de raíces.

La unidad 2 (27-62 cm, nm: 17): Es la unidad intermedia de la secuencia sedimentaria. Los sedimentos de la unidad tienen limo calcáreo macizo que varía entre color blanco y color rosa.

La unidad 3 (62-300 cm, nm: 119): Es la unidad más profunda de la columna sedimentaria. Los sedimentos están formados por limo con lentes de yeso macizo. Los cristales de yeso son macroscópicos y tienen diámetros entre 0.5 y 1 cm.

### 5.1.2. Control Cronológico

El análisis por radiocarbono para determinar la edad de la muestra 132 (262-264 cm) con el código de laboratorio 16OS/0417 arrojó una edad de  $24\,330 \pm 100$  años aP (Tabla 2). La edad se calibró a años calendario utilizando la curva de calibración intcal 13 (Figura 25) con el software Calib 7.1 (Reimer *et al.* 2019). Esto dio como resultado, que la edad de la muestra 132 (262-264 cm) se depositó hace 28 mil 380 años o 28 380 años antes del presente (1950). Esto sugiere que la secuencia sedimentaria de 300 cm corresponde al periodo del Cuaternario Tardío.

Tabla 2. Valor del análisis por radiocarbono y fecha calibrada con el software Calib 7.1 (Reimer *et al.* 2019) para la muestra a una profundidad de 262-264 cm.

<b>Código Laboratorio</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b><sup>14</sup>C edad (años aP)</b>	<b>Edad Calibrada (1 sigma, cal años AP)</b>	<b>Edad de probabilidad mediana (cal años aP)</b>
16OS/0417	262-264	$24\,330 \pm 100$	28 230 – 28 541	28 380



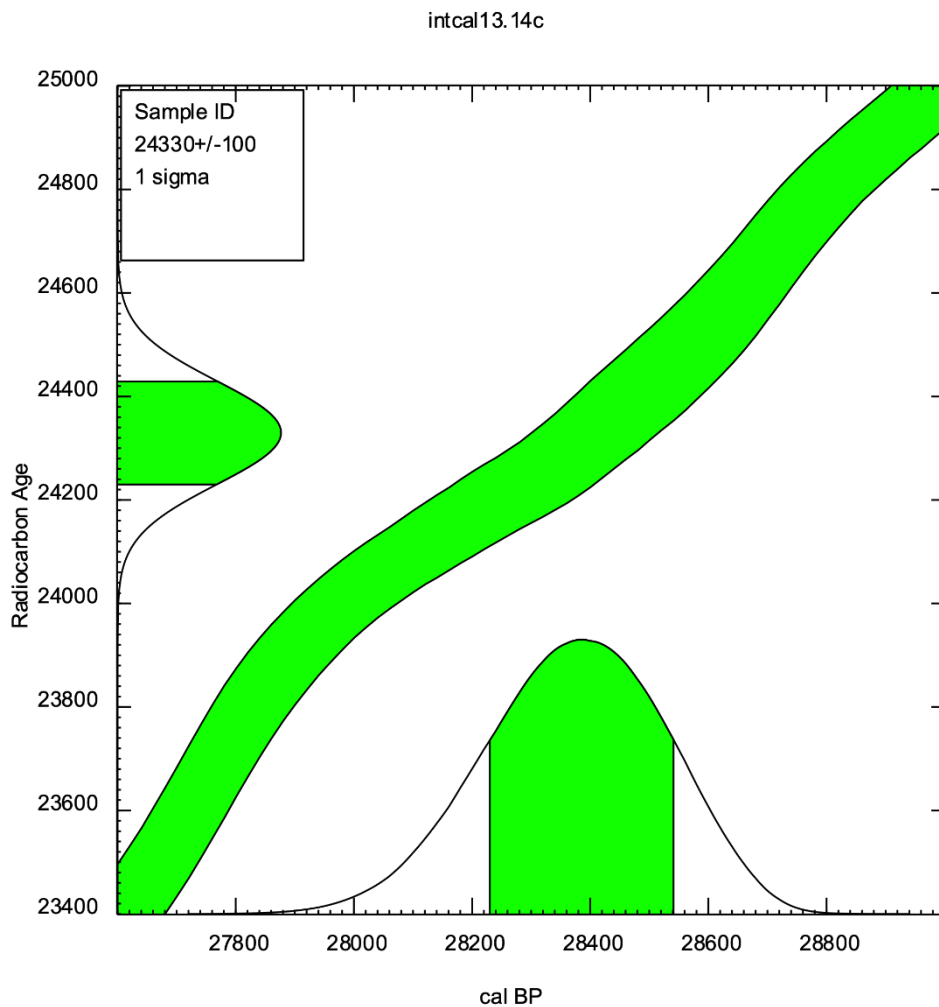


Figura 25 Gráfico que muestra la calibración del valor de edad convencional a edad calendario antes del presente (1950) utilizando el software Calib 7.1 (Reimer et al. 2019). El eje X representa los años calibrados antes del presente (BP, Before Present o antes del presente) y el eje Y es la edad obtenida por análisis de radiocarbono.

### 5.1.3. Concentración de carbonatos, cloruros y sulfatos

En la Tabla 3. se presentan los valores mínimos, máximos y promedio de las concentraciones de los carbonatos, cloruros y sulfatos para la estimación de abundancias de sales minerales presentes en los sedimentos a lo largo de las tres unidades. En los registros, la concentración de carbonatos, cloruros y sulfatos presentan pequeñas variaciones (Figura 26). Sin embargo, se hizo una generalización del comportamiento de estos, para calcular sus valores mínimos, máximos y promedio. En general, la concentración de sulfatos tiene mayor abundancia y el contenido de cloruros es mínimo.

*Tabla 3. Valores máximos, mínimos y promedio de las concentraciones de sales minerales dividido por carbonatos, cloruros y sulfatos. La concentración de sulfatos presenta los valores máximos a lo largo del perfil sedimentario. Por otro lado, el contenido de cloruros es mínimo.*

Unidad	Carbonatos (%)			Cloruros (%)			Sulfatos (%)		
	Min.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio
<b>1 (0 a 27 cm)</b>	3.34	22.80	8.97	0.08	0.15	0.11	1.10	54.43	33.33
<b>2 (27 a 62 cm)</b>	0.65	2.74	0.93	0.14	0.19	0.16	62.80	82.66	77.57
<b>3 (62 a 300 cm)</b>	0.65	2.59	0.81	0.09	0.21	0.15	51.42	82.52	65.42

La unidad 1 (27-0 cm, nm: 14) tiene una concentración de carbonatos que oscila entre 3.34 a 22.80 %, con una media de 8.97 %. Por otro lado, la concentración de cloruros ronda entre 0.08 a 0.15 %, teniendo una media de 0.11 %. Por último, la concentración de sulfatos se encuentra entre 1.10 a 54.43 %, donde la media es de 33.33 %.

La unidad 2 (62-27 cm, nm: 17) tiene una concentración de carbonatos que oscila entre 0.65 a 2.74 %, teniendo una media de 0.93 %. Por otro lado, la concentración de cloruros ronda entre 0.14 a 0.19 %, con una media de 0.16 %. Por último, la concentración de sulfatos se encuentra entre 62.80 a 82.66 %, donde la media es de 77.58 %.

La unidad 3 (300-27 cm, nm: 119) tiene una concentración de carbonatos que oscila entre 0.65 a 2.59 %, teniendo una media de 0.81 %. Por otro lado, la concentración de cloruros ronda entre 0.09 a 0.21 %, con una media de 0.15 %. Por último, la concentración de sulfatos se encuentra entre 51.42 a 82.51 %, donde la media es de 65.42 %. En esta unidad el comportamiento de los sulfatos y cloruros puede ser dividido de dos maneras. En los registros de sulfatos y cloruros (Figura 26) la concentración de estos presenta pequeñas variaciones a lo largo de la unidad, sin embargo, se hizo una generalización de este comportamiento. La concentración de sulfatos va en aumento a partir de los 300 cm y hasta 155 cm, con un valor promedio de 66.18 %; a partir de este segmento y hasta los 62 cm la concentración va disminuyendo con un valor promedio de 64.57 %. Por otro lado, al analizar el comportamiento de la concentración de cloruros en los sedimentos, estos disminuyen a lo largo del segmento con profundidades de 300 a 195 cm, con un valor promedio de 0.11 %; la concentración que se encuentra dentro de la porción de la trinchera que va de 195 y 62 cm presenta un aumento, con una media de 0.17 %.

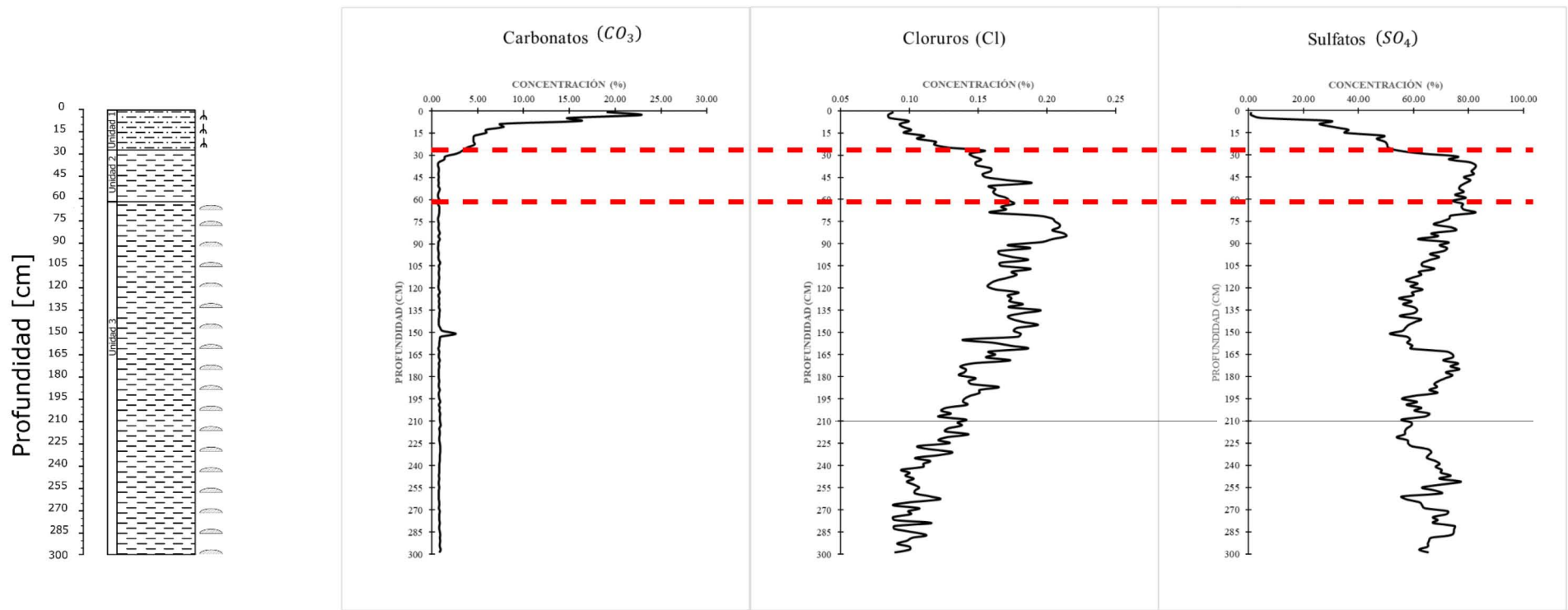


Figura 26 Variación de las sales minerales con respecto a la profundidad en la trinchera SAN-1. Las líneas rojas marcan la separación entre unidades.

## 5.2. Procesamiento y análisis de datos geofísicos

### 5.2.1. Técnica de inversión de datos

La inversión de datos puede definirse como un conjunto organizado de métodos matemáticos cuyo objetivo es analizar una serie de datos u observaciones para extraer información significativa sobre algún fenómeno físico, a partir de inferencias derivadas de las observaciones (Menke, 1989).

Las propiedades físicas de la Tierra se pueden describir de la siguiente manera:

- a) Como parámetros discretos; se caracterizarán utilizando ecuaciones matriciales
- b) Utilizando funciones continuas; se caracterizarán utilizando teoría de ecuaciones integrales.

Al adecuar un fenómeno físico utilizando la inversión de datos, se debe contemplar lo siguiente (Nava, 2018)

- a) Los datos deben formularse en términos de valores numérico o de propiedades específicas (parámetros del modelo).
- b) Problema directo → Estimación de los resultados de mediciones (datos) basándose en un modelo o un conjunto de condiciones relevantes para el problema (parámetros del modelo).
- c) Problema Inverso → Estimación de los parámetros del modelo utilizando los datos o el modelo.

Al trabajar con el problema inverso se asumirá que los parámetros del modelo y los datos tiene una relación, a esto se le conoce como modelo. Normalmente esta relación es representada a partir de una o más ecuaciones. El objetivo de la teoría de inversión será resolver esta ecuación para los parámetros del modelo o para cualquiera de las posibles variantes que pueden surgir. Ya que al usar métodos de inversión de datos se nos presentara el problema de la no unicidad, es decir, para los mismos datos medidos, hay un gran rango de modelos que darán los mismos resultados.

El modelado matemático que se utiliza para los datos obtenidos utilizando la tomografía de resistividad eléctrica seguirá la siguiente secuencia. 1) El cálculo de la resistividad eléctrica usando un método de diferencias finitas o elementos finitos, 2) se debe seleccionar una técnica de optimización no lineal, 3) calcular los elementos de la matriz jacobiana, y, por último, 4) resolver el sistema de ecuaciones (Tejero *et al.* 2002).

Debido a que el comportamiento de la resistividad eléctrica del subsuelo es arbitrario es conveniente utilizar métodos de diferencias finitas, ya que estos dividen el suelo en cientos de celdas con valores de resistividad diferentes. Loke y Barker (1996) desarrollaron un algoritmo para calcular la resistividad eléctrica. Esta técnica se basa en el método de mínimos cuadrados. En el caso de datos eléctricos, los parámetros del modelo estarán dados por los valores de resistividad de las celdas del modelo, y los datos serán aquellos valores de resistividad aparente medidos.

La representación de los datos estará dada por la ecuación 5.1:

$$d = [d_1, d_2, d_3, d_4, \dots, d_N]^T \quad (5.1)$$

Los parámetros del modelo estarán dados por la ecuación 5.2:

$$m = [m_1, m_2, m_3, m_4, \dots, m_M]^T \quad (5.2)$$

La relación entre el modelo y los datos estará representada con la ecuación lineal 5.3:

$$d_i = \sum_{j=1}^M G_{ij} m_j \quad (5.3)$$

Donde la matriz  $G$  es el kernell de inversión.

La manera en que este tipo de problemas lineales se solucionan es basándose en la diferencia del tamaño de los parámetros del modelo  $m_{est}$  y de los datos calculados  $d_{cal}$  (Ecuación 5.4).

$$d_{cal} = G m_{est} \quad (5.4)$$

Para conocer que tan convenientes serán nuestros datos calculado se utiliza el método de mínimos cuadrados, el cual busca elegir aquellos parámetros del modelo de tal manera que los datos calculados y observados sean muy cercanos (Ecuación 5.5).

$$e_i = d_i^{obs} - d_i^{cal} \quad (5.5)$$

El mejor ajuste del modelo será aquel cuyo error sea el más pequeño. Para calcular los valores de resistividad eléctrica se utilizan principalmente tres métodos para un modelo en específico (Loke, 1996).

- 1) Métodos analíticos (se ven restringidos por geometrías simples)
- 2) Métodos de elementos de frontera (el número de regiones con valores de resistividad es limitada)
- 3) Métodos de elementos finitos o diferencias finitas

Para los métodos de optimización, el modelo inicial se modifica iterativamente hasta que la diferencia entre el modelo y los datos observados se reduzcan, como se explicó anteriormente. En el caso del método de mínimos cuadrados optimizados, el modelo inicial se modificará haciendo que la suma de los cuadrados del error se minimice (Ecuación 5.6).

$$E = e^T e = \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (5.6)$$

Para reducir el valor del error y determinar el cambio en los parámetros del modelo, se usa la ecuación de Gauss-Newton, la cual debería reducir la suma del error cuadrático (Ecuación 5.7).

$$J^T J * \Delta q_i = e^T e \quad (5.7)$$

Donde  $\Delta q$  es el vector de cambios de los parámetros del modelo,  $J$  es la matriz jacobiana de las derivadas parciales (Ecuación 5.8), la cual representa el cambio en la respuesta del modelo como efecto del cambio en los parámetros del modelo.

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (5.8)$$

Después de calcular el vector de cambios de parámetros, se obtiene un nuevo modelo (Ecuación 5.9).

$$q_{k+l} = q_k + \Delta q_k \quad (5.9)$$

Si el producto de las matrices  $J^T J$  no es singular, puede ser debido a que el modelo inicial es muy diferente del modelo óptimo utilizado. Un método para evitar este tipo de situaciones es la modificación de Marquardt-Levenberg a la ecuación de Gauss-Newton (Park y Van, 1991) (Ecuación 5.10).

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q_x = J^T g \quad (5.10)$$

Donde  $I$  es la matriz identidad y  $\lambda$  es un factor conocido como Marquardt o damping. La función de este factor es contrarrestar el rango de valores que las componentes  $\Delta g$  puedan tomar. Este método minimiza una combinación de la magnitud del vector de discrepancia y el vector de parámetros. Si se requiere hacer la inversión de una zona con un gran número de capas este método no resulta conveniente, ya que presentara una distribución de resistividad errónea para zonas altas y bajas. Una solución a este problema se puede hacer una modificación de la ecuación de mínimos cuadrados por Gauss-Newton haciendo que las variaciones espaciales en los parámetros del modelo se vean reducidos. A este método se le conoce como método de mínimos cuadrados suavizado y restringido (Ecuación 5.11).

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \quad (5.11)$$

Donde  $F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z$ ;  $C_x, C_y$  y  $C_z$  son las matrices suavizadas en la dirección  $x, y, z$ ;  $\alpha_x, \alpha_y$  y  $\alpha_z$  son pesos relativos dados por los filtros suavizados. El objetivo de la ecuación  $F$  es minimizar el cuadrado de los cambios espaciales o la desigualdad de los valores del modelo de resistividad.

Una forma común de representar la matriz suavizada es con la matriz de diferencias de primer orden dada por la matriz 5.12 (Loke, 1996).

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ & & & \dots & \dots & & & \\ & & & & \dots & & & \\ & & & & & \dots & & \\ & & & & & & \dots & \\ & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Esta ecuación producirá un modelo con variaciones suaves en los valores de resistividad, esto será útil cuando con la variación en la resistividad eléctrica sea gradual. Sin embargo, en la realidad puede haber zonas homogéneas, pero con cambios drásticos entre estas, para solucionar esto se modifica la ecuación 5.12 (Claerbout y Muir, 1973)

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

Donde  $F = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z$

### 5.2.2. Resultados

Se utilizó el software *RES2DINV* para la inversión de datos de resistividad eléctrica aparente obtenidos en campo. Este software determina un modelo bidimensional de resistividades eléctricas reales del subsuelo a partir de un conjunto de datos que constituyen una pseudosección de resistividades aparentes (Tapias et al. 2005). Este programa determina los valores de resistividad eléctrica a partir de una rutina de modelización y una técnica de optimización no lineal de mínimos cuadrados (Loke y Barker, 1995).

Antes de realizar la inversión de los datos, este software ofrece diversas opciones para preparar y mejorar los datos, con la finalidad de adecuarlos a un mejor modelo matemático. Se utilizó un método de inversión robusto, esto para que los datos que presentaran ruido se aminoraran y no causarían un efecto grande en el modelo. Este método minimiza la diferencia absoluta entre los valores de resistividad eléctrica aparente medidos y los calculados. Al utilizar esta función, se pide un factor que establece que aquellos valores cuya diferencia sea mayor, serán eliminados. Para este trabajo se mantuvo el factor recomendado, el cual fue de 5%. También se modificó el grosor de las capas, esto para que los datos de resistividad eléctrica calculado sean más precisos y se ajustaran mejor con la malla. Por último, se consideró un modelo de celdas con la mitad del espacio entre estos ya que en los extremos de presentaban variaciones de resistividad eléctrica en la superficie, posteriormente se realizó la inversión con 4 iteraciones dando como resultado un error de 3.4 (dipolo-dipolo), 1.31% (Wenner-Schumberger) y 3.7 % (Wenner).

Los perfiles geoelectricos obtenidos cerca de la trinchera se exportaron al programa *Surfer 13*, un software de interpolación que facilita el manejo de información y la visualización de mapas. Esto se hizo para mejorar la presentación de los perfiles geoelectricos (Figura 27, 28 y 29).

Los tres perfiles geoelectricos realizados fueron divididos en tres capas. Esta división se basó en el comportamiento de la resistividad eléctrica, es decir, aquellas zonas que comparten valores de resistividad eléctrica similares se consideraron como una capa, quedando de la siguiente manera:

En el arreglo Dipolo-Dipolo la primera capa abarca hasta una profundidad de 1.30 [m], teniendo valores de resistividad menores a  $22 [\Omega \cdot m]$ . Subyaciéndola se encontró una capa de espesor considerable alrededor de 3 metros. En esta capa se observó una superficie discontinua cuyos valores de resistividad van de 16 a  $28 [\Omega \cdot m]$ , fue interrumpida horizontalmente por superficies con valores de resistividad de 21 a  $85 [\Omega \cdot m]$ . La tercer y ultima capa comienza a una profundidad de 3.75 [m] teniendo un espesor de 6 [m] aproximadamente los valores de resistividad varían de 3 a  $16 [\Omega \cdot m]$ . La profundidad máxima alcanzada para este arreglo fue de 9.75 [m] (Figura 27).

En el caso del arreglo Wenner-Schlumberger se observó un horizonte heterogéneo a partir de la profundidad que va de 0.5 a 1.40 [m] con valores de resistividad que varían entre 1 y  $9 [\Omega \cdot m]$ . Por debajo de este horizonte se encontró una capa discontinua con un espesor aproximado de tres metros con valores de resistividad de 9 a  $41 [\Omega \cdot m]$ . En la última capa se aprecia de la profundidad de 5 a 9 [m] donde los valores de resistividad varían entre 3 y  $9 [\Omega \cdot m]$ . Este arreglo alcanzo una profundidad máxima de 8.97 [m] (Figura 28).

Por último, para el arreglo Wenner, se observó una capa eléctrica heterogénea abarca hasta la profundidad de 0.75 [m], cuyos valores de resistividad que van de 9-28  $[\Omega \cdot m]$ . Lateralmente esta zona se ve interrumpida por anomalías eléctricas con resistividades mayores las cuales abarcan valores de 21 a  $59 [\Omega \cdot m]$ . Subyaciendo a esta capa, se aprecia un horizonte casi continuo a partir de la profundidad de 0.75 a 2 [m] de 1 a  $9 [\Omega \cdot m]$ . La última capa abarca de los 2 hasta los 3.15 [m] (siendo esta la profundidad máxima alcanza con la TRE) la resistividad eléctrica varia de 9 a  $47 [\Omega \cdot m]$  (Figura 29).



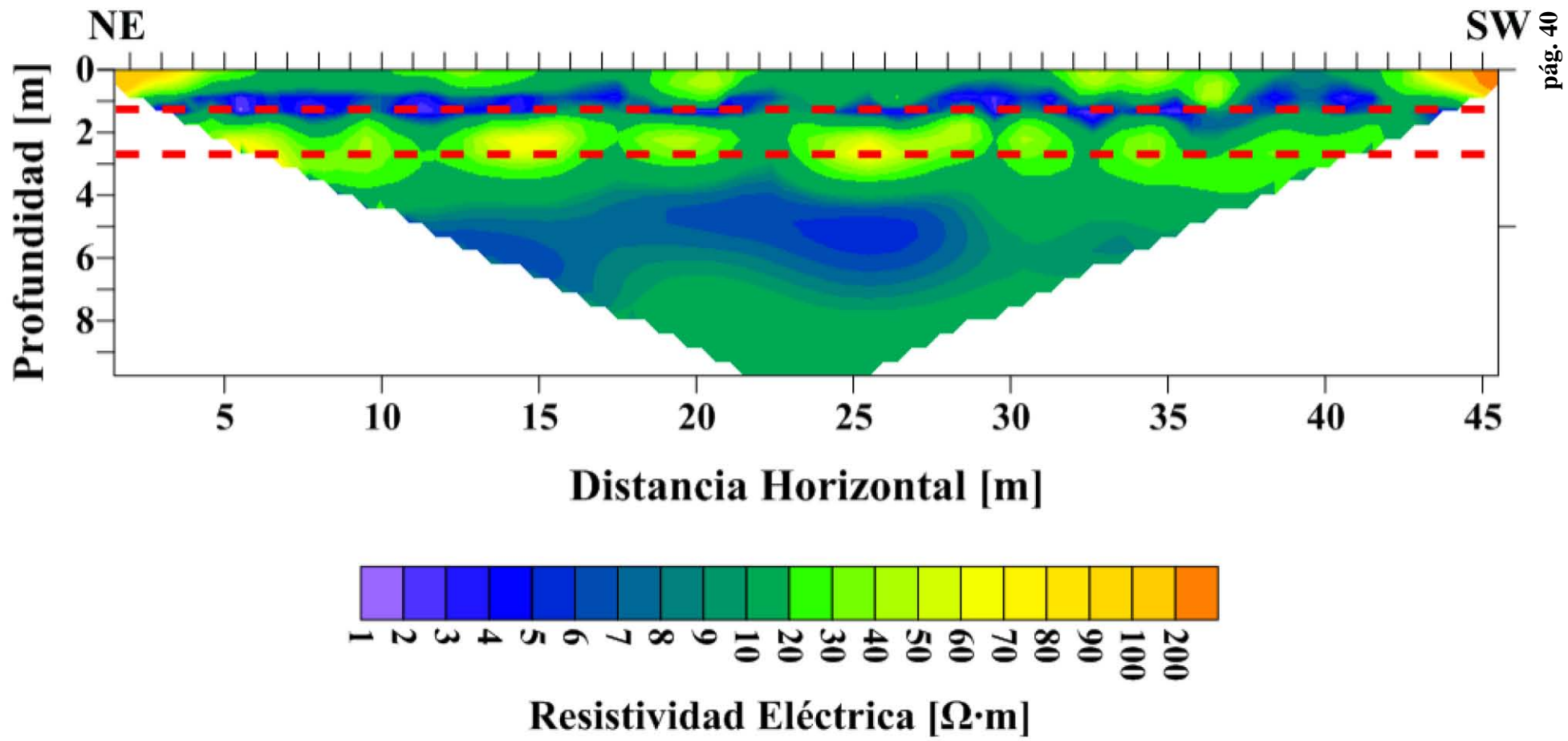


Figura 27 Perfil geoelectrico de la tomografía de resistividad eléctrica utilizando el arreglo Dipolo-Dipolo para un espaciamiento entre electrodos de 1 m en la cuenca Sandia.

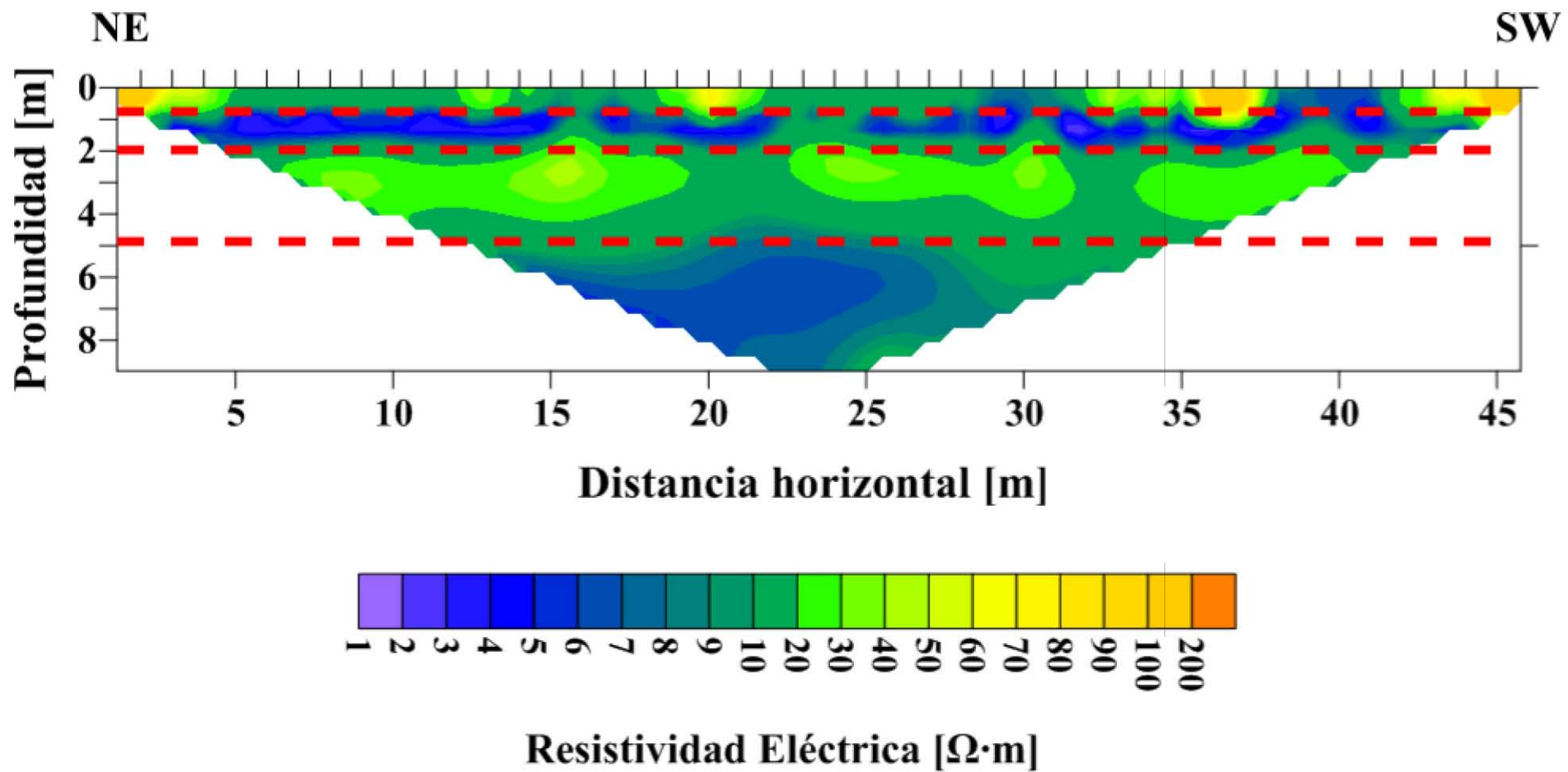


Figura 28 Perfil geoelectrico de la tomografía de resistividad eléctrica utilizando el arreglo Wenner-Schlumberger para un espaciamiento entre electrodos de 1 m en la cuenca Sandia.

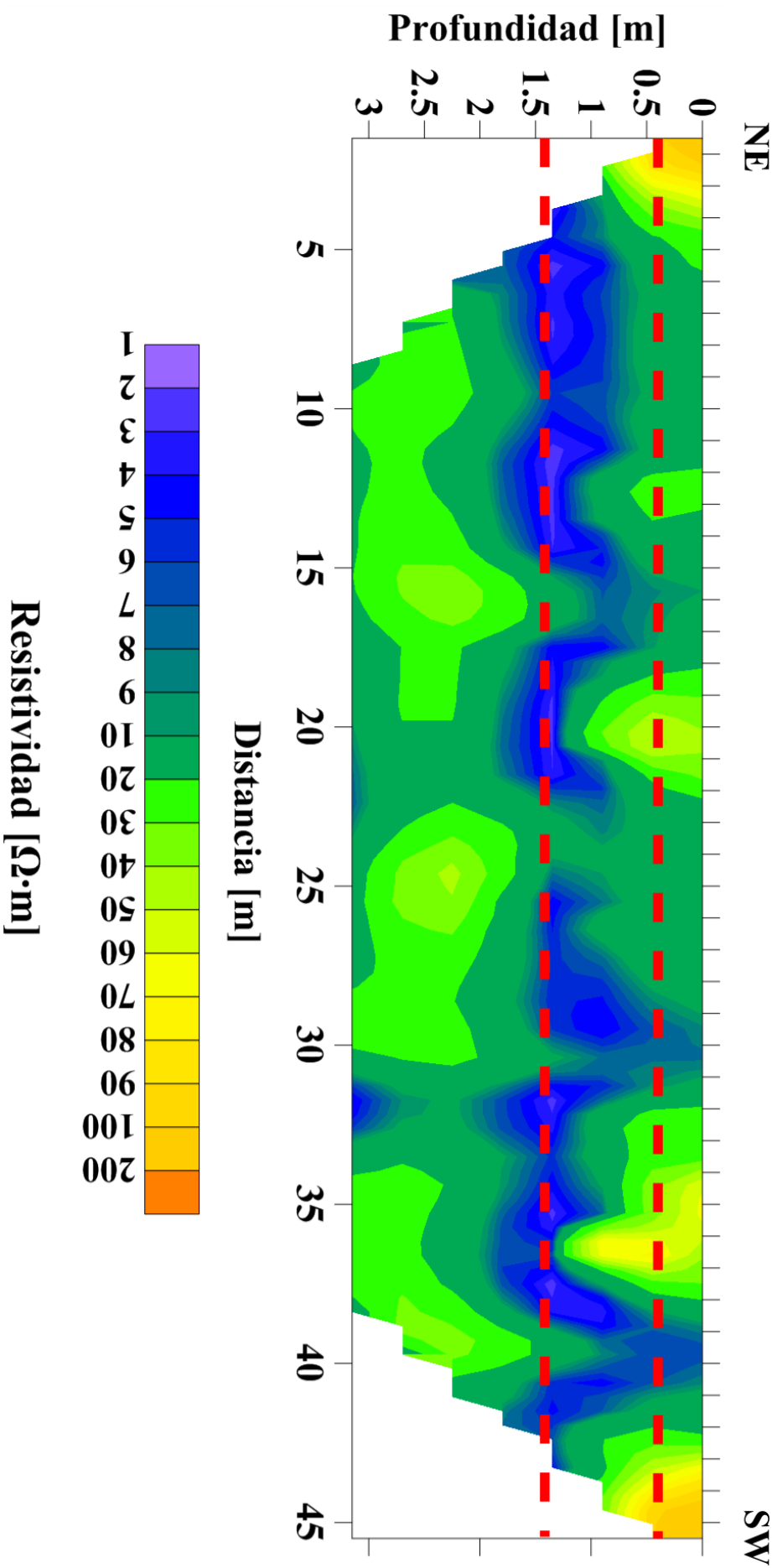


Figura 29 Perfil geoelectrico de la tomografía de resistividad eléctrica utilizando el arreglo Wenner para un espaciamiento entre electrodos de 1 m en la cuenca Sandia.

### Discusión de resultados

#### 6.1. Integración de datos

##### 6.1.1. Análisis de los perfiles geoelectricos

La primera parte de la integración de datos consiste en la comparación de los tres perfiles geoelectricos. El modelo producto del arreglo Wenner es el que mayor información arroja debido a que posee la misma profundidad que la trinchera. Sin embargo, se hizo una comparación entre los arreglos electrocicos. Esto para verificar que el comportamiento de la resistividad eléctrica actúe de manera similar (Figura 30).

Se observó lo siguiente:

El arreglo Wenner logro visualizar los primeros tres metros del subsuelo dentro del área de estudio. La primera capa geoelectrica tiene un espesor de aproximadamente un metro con valores de resistividad que varían de 9 a 20 [ $\Omega \cdot m$ ]. Dentro de esta capa se observó la presencia de dos estructuras, la primera comienza a partir del fiducial 18 [m] (con respecto al eje horizontal) y la segunda estructura se encontró a partir del fiducial 33 [m], ambas se extienden alrededor de 3 m. La resistividad eléctrica de la primera estructura varía entre 28 y 65 [ $\Omega \cdot m$ ] en el arreglo Wenner y aumenta hasta los 53 [ $\Omega \cdot m$ ] en el arreglo dipolo-dipolo. En el caso de la segunda estructura, se observó un aumento en la resistividad eléctrica que alcanzo 84 [ $\Omega \cdot m$ ], mientras que para los arreglos Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger alcanzo valores de 65 y 213 [ $\Omega \cdot m$ ], respectivamente. La conducta en la capa 1 se repite para los arreglos Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo. En ambos casos la resistividad fluctúa entre 1 a 21 [ $\Omega \cdot m$ ] y 1 a 34 [ $\Omega \cdot m$ ],

La segunda capa comienza a partir del primer metro, se observó una disminución en la resistividad eléctrica, ya que los valores fluctúan entre 1 y 9 [ $\Omega \cdot m$ ]. Esta conducta se repite para los arreglos Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo. La última y tercera capa, comienza a partir de los 2 m para el arreglo Wenner-Schlumberger, esta sección presenta un aumento en la resistividad eléctrica con un rango de valores de 9 a 47 [ $\Omega \cdot m$ ], el arreglo Wenner-Schlumberger se comporta de manera similar. En el arreglo Dipolo-Dipolo este rango de valores aumenta ligeramente de 16 a 84 [ $\Omega \cdot m$ ]. Para los sedimentos presentes en los últimos 6 m hay un descenso en la resistividad eléctrica de 3 a 16 [ $\Omega \cdot m$ ].

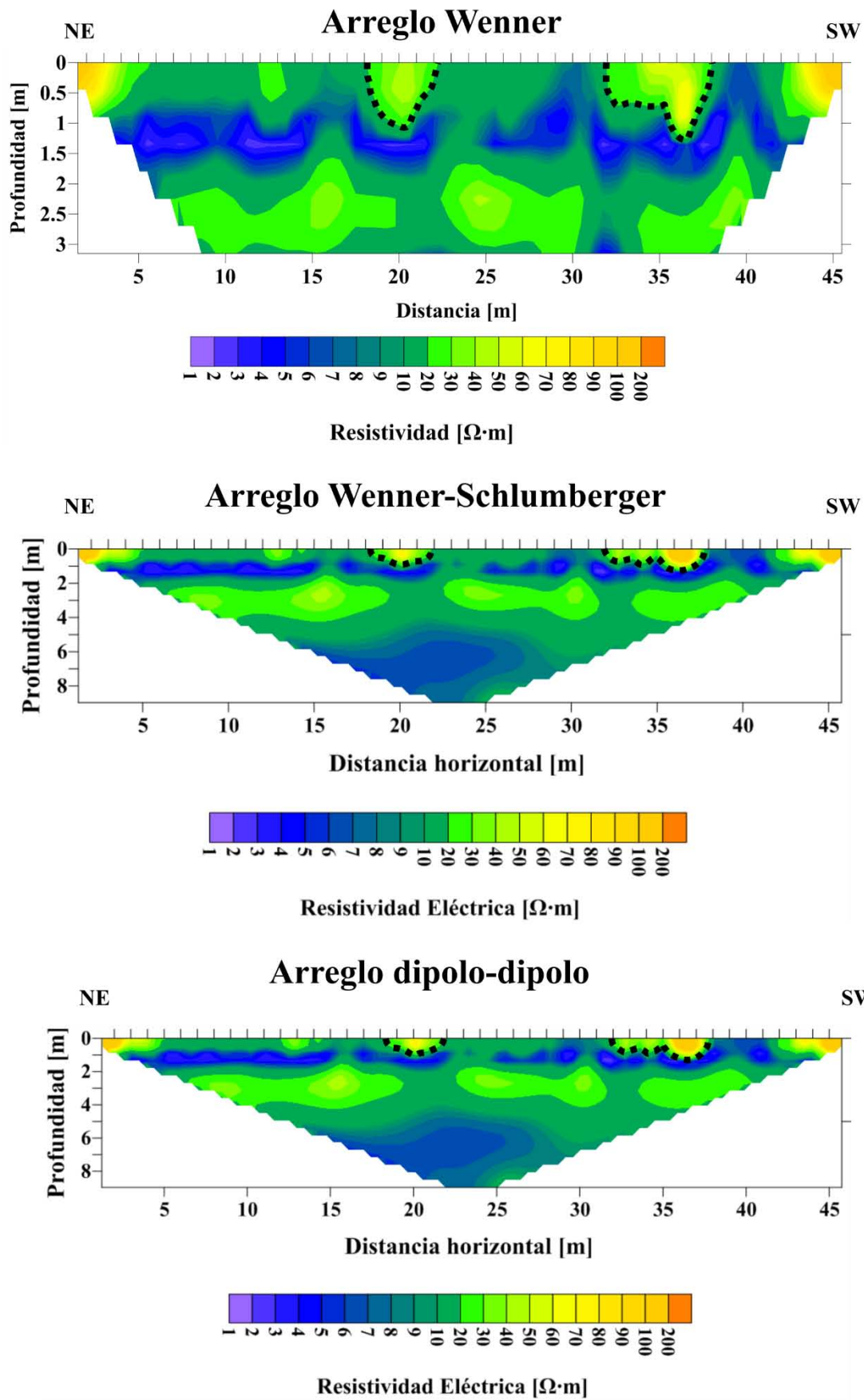


Figura 30 Comparación del comportamiento de la resistividad eléctrica de los tres perfiles geoelectricos. Las líneas naranjas discontinuas corresponden al límite de cada capa, las estructuras presentes en el perfil están delimitadas con líneas punteadas negras.

### *6.1.2. Correlación entre la secuencia evaporítica y el perfil geoelectrico (arreglo Wenner)*

La Figura 31 muestra la correlación del modelo eléctrico del arreglo Wenner y la tercera unidad sedimentaria (Unidad 3: 300-32 cm). Esto debido a que la resolución espacial de la tomografía de resistividad eléctrica no permitió visualizar las primeras dos unidades sedimentarias (Unidad 2: 62-27 cm y Unidad 1: 27-0 cm).

No se realizó una correlación entre el modelo eléctrico y la concentración de carbonatos ( $CO_3$ ) de la unidad 3, ya que su contenido mantiene un comportamiento casi uniforme (0.81 %), presentando un aumento a los 151 cm (2.59 %). Sin embargo, esta variación es muy puntual en la escala vertical (profundidad) y pequeña para verse reflejada en el modelo.

#### *6.1.2.1. Correlación entre la concentración de cloruros y el perfil geoelectrico*

La concentración de cloruros (0.09-21 %) a lo largo de la unidad 3 se está comportando de dos maneras. Se observan pequeñas fluctuaciones en la concentración de 300- 195 cm. Sin embargo, no fue posible visualizarlas en el modelo por lo que se hizo una generalización de este comportamiento, es decir se realizó el promedio en esta primera sección. La concentración de cloruros es de 0.11 % para los sedimentos de la parte inferior (300-195 cm) de la unidad 3 y aumento al 0.17 % en la parte superior (195-62 cm) (Figura 32). Las resistividades poseen mayor diversidad en las rocas sedimentarias. Los valores altos de resistividad eléctrica corresponderán a las evaporitas (Orellana, 1974). La respuesta de los depósitos evaporíticos, por ejemplo, la anhidrita o sal oscila entre  $10^2 - 10^3 [\Omega \cdot m]$ . Ante la presencia de este tipo de materiales en la zona de estudio se esperan valores altos de resistividad. Sin embargo, se debe recordar que la resistividad de una roca se verá influenciada por diversos factores como la porosidad, el grado de saturación de agua y la concentración de sales disueltas, entre otros, por lo que la respuesta de la resistividad puede variar por varios órdenes de magnitud como se muestra en la Figura 32.

Al comparar la respuesta de la resistividad eléctrica con el perfil geoelectrico se observó bajos valores (1-9  $[\Omega \cdot m]$ ) de resistividad eléctrica mientras que la concentración de cloruros va en aumento. Por otro lado, los valores de resistividad eléctrica más altos (9-47  $[\Omega \cdot m]$ ) se presentan cuando hay un descenso en la concentración de cloruros (Figura 32). Esta conducta es contraria a la esperada, y se asocia a que la concentración de cloruros no es suficiente como para tener un impacto en el comportamiento de la resistividad eléctrica de la zona de estudio. Esta concentración es pequeña al compararla con las concentraciones promedio de la abundancia de carbonatos y sulfatos (0.81 % y 65.42%, respectivamente).

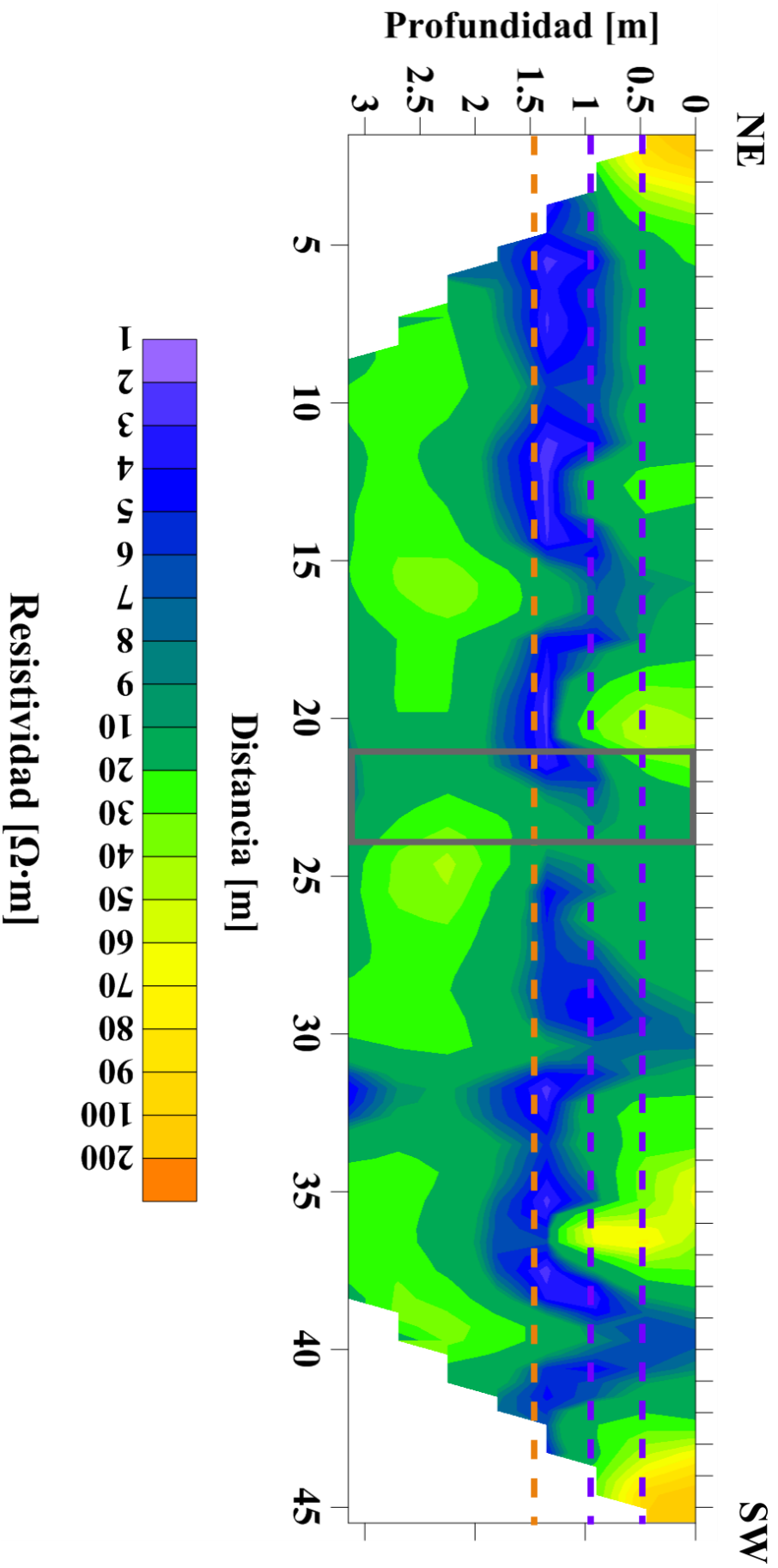


Figura 31 Perfil geoelectrico obtenido con el arreglo Wenner. El rectángulo gris representa la zona que se correlaciono con los registros de sales minerales. La línea discontinua morada corresponde a la división de unidades sedimentarias 0(Unidad 3.:300-62 cm, Unidad 2: 62-27 cm, Unidad 1: 27-0 cm. Las Líneas discontinuas naranjas corresponden a las capas geoelectricas encontradas.

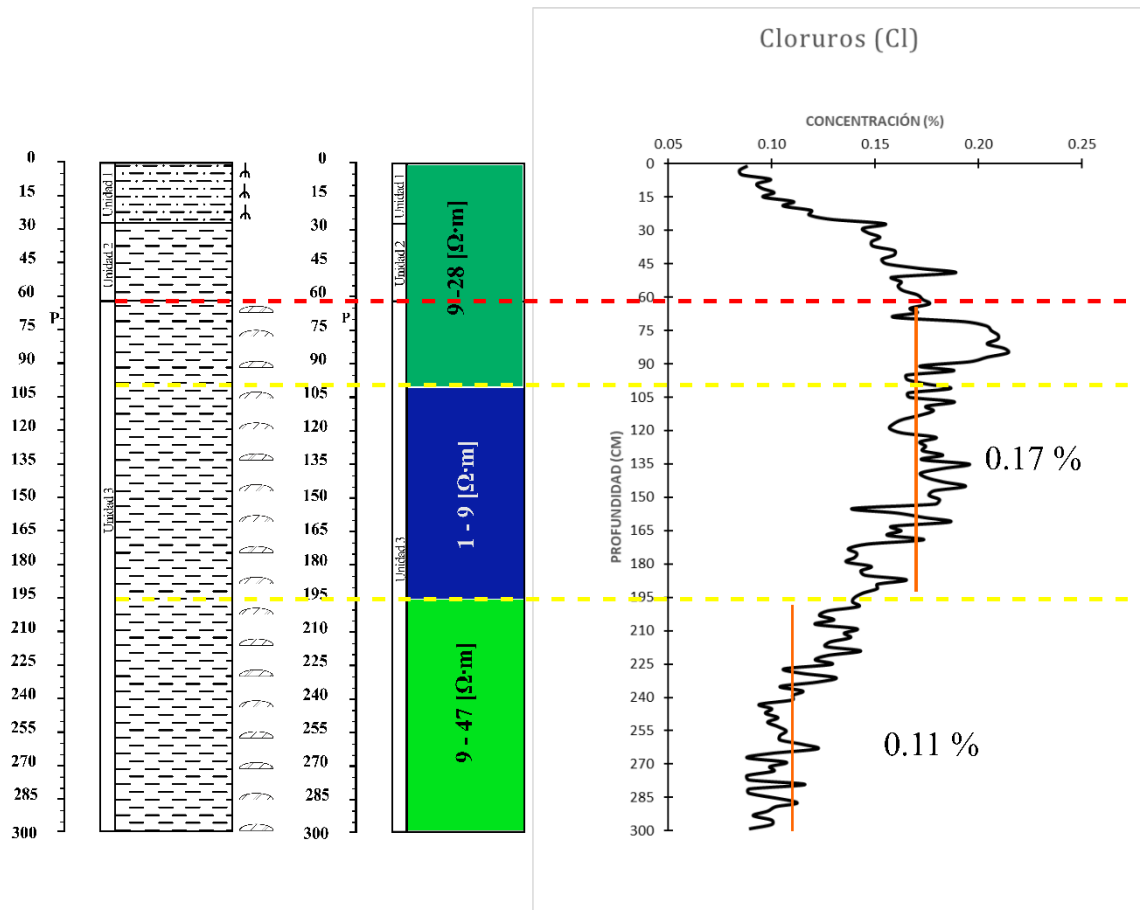


Figura 32 Comparación entre la resistividad eléctrica de la trinchera y la variación en la concentración de cloruros. La línea discontinua roja marca el inicio de la Unidad 3 (300-62 cm), las líneas amarillas discontinuas corresponden a las capas geoelectricas encontradas con la tomografía eléctrica.

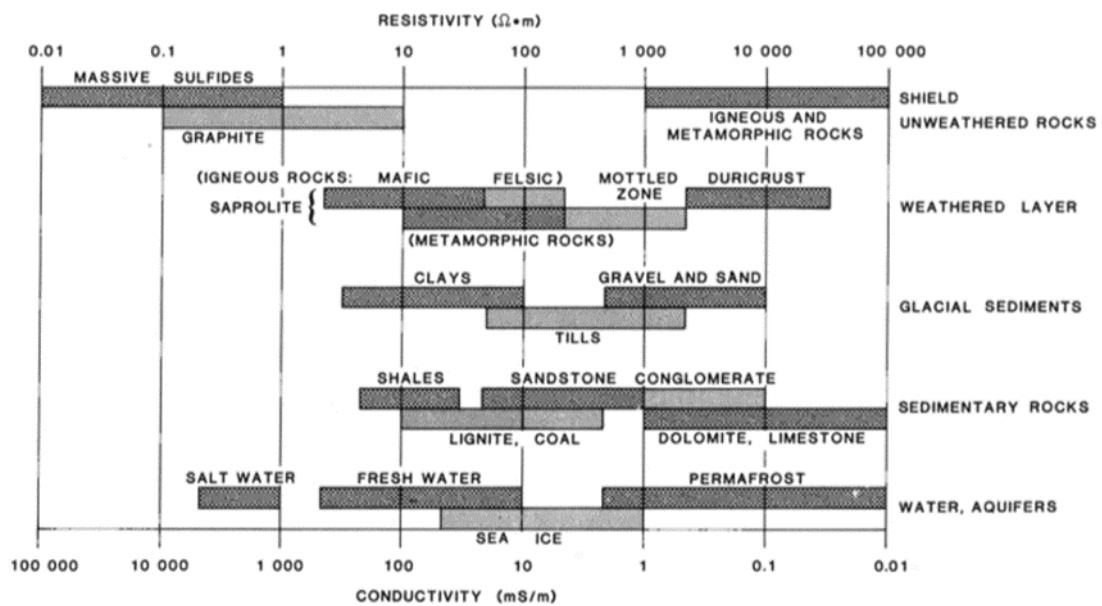


Figura 33 Rangos de resistividad típicos para diferentes materiales de la Tierra (Palacky, 1987).



### 6.1.2.2. Correlación entre la concentración de sulfatos y el perfil geoelectrico

La concentración de sulfatos (51.41-82.52%) también muestra dos tendencias. En la parte inferior de la Unidad 3 (300-160 cm) se observaron variaciones en la concentración de sulfatos con un promedio relativamente mayor (65.97 %) en comparación con la parte superior (Figura 34). Se decidió generalizar el contenido en la concentración de sulfatos en este horizonte, ya que no presentaba grandes variaciones. Este comportamiento se refleja en el perfil geoelectrico como un aumento en la resistividad eléctrica, con valores de 9-47 [ $\Omega \cdot m$ ]. En la parte superior de la Unidad 3 (160-62 cm), la concentración de sulfatos disminuye (64.89 %). En el perfil geoelectrico ocurre una disminución en la resistividad eléctrica (1-9 [ $\Omega \cdot m$ ]). Los cambios de resistividad entre las capas geoelectricas 2 y 3 (Figura 31) no se asociaron con la variación de sulfatos, debido a que la diferencia entre las secciones a y b (Figura 34) no es significativa ( $\sim 1\%$ ), por lo que no tendrá un efecto sobre la resistividad eléctrica de la trinchera. Debido a esto los cambios de resistividad eléctrica presentes en la zona estarán asociados a otros factores.

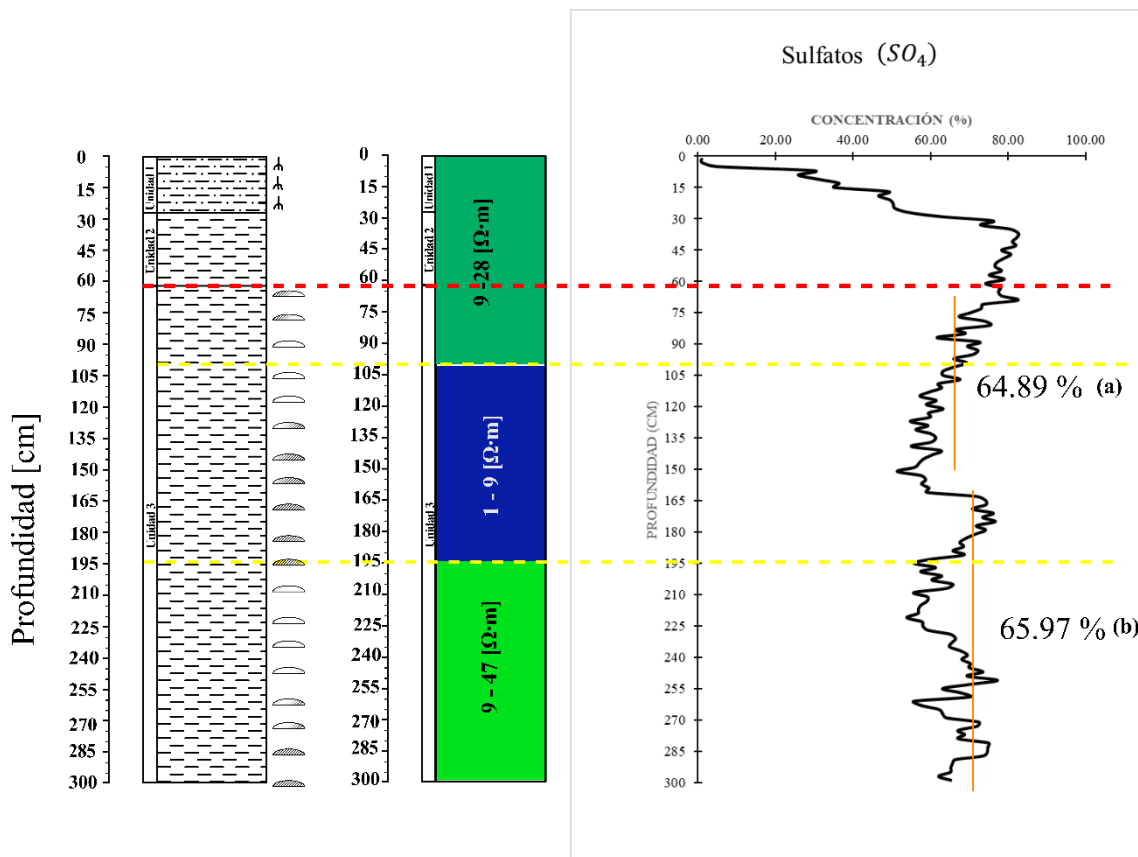


Figura 34 Comparación entre la resistividad eléctrica de la trinchera y la variación en la concentración de sulfatos. La línea discontinua roja indica el inicio de la Unidad 3 (300-62 cm), las líneas amarillas discontinuas corresponden a las capas geoelectricas encontradas con la tomografía eléctrica.

Se esperan valores altos de resistividad eléctrica ante la presencia de rocas sulfatadas compactas. El yeso se encuentra en asociación con minerales carbonatados (calcita y/o dolomita) y menores como la celestita, cuarzo, anhidrita y glauberita. Los minerales sulfatados son principalmente cristalinos, sin embargo, esta textura puede tener variaciones debido a los procesos diagenéticos transformándose entre anhidrita y yeso.

Este proceso afecta a los sedimentos haciendo que la textura pase de cristalina a clástica. La resistividad eléctrica oscila entre 10-1200 [ $\Omega \cdot m$ ], dependiendo de la pureza del yeso (Guinea *et al.* 2010, 2012, Martínez *et al.* 2013, Lugo *et al.* 2008). En estos trabajos se ha encontrado una relación entre la conductividad y el contenido de sulfatos. Guinea *et al.* (2010b) presentan una clasificación de rocas sulfatadas, estableciendo una relación directa entre los valores de resistividad eléctrica y el porcentaje de matriz presente en el material (Tabla 4).

Tabla 4 Clasificación geoelectrica de rocas sulfatadas (Guinea *et al.* 2012)

	Pureza del yeso (%)	Resistividad [ $\Omega \cdot m$ ]
Lutitas y yesos ricos en lutita	0-55	10-100
Yeso transicional	55-75	100-700
Yeso puro	75-100	700-1000

La resistividad alcanza hasta los 900 [ $\Omega \cdot m$ ] cuando el contenido de yeso es mayor al 90%. Por otro lado, la resistividad eléctrica decae hasta obtener valores por debajo de 100 [ $\Omega \cdot m$ ] si el contenido de yeso está acompañado por otro material, por ejemplo, lutitas considerando que la pureza de la roca sea menor al 10%.

Los valores de resistividad eléctrica obtenidos por la tomografía de resistividad eléctrica asociados a los sedimentos de la zona de estudio son comparables con los valores que corresponden a los yesos con presencia de materiales clásticos debido al rango bajo de valores que va de 1-47 [ $\Omega \cdot m$ ]. Por lo explicado anteriormente, estos valores se asocian a la presencia de yesos envueltos por una matriz compuesta por materiales clásticos.

Otra probable respuesta al comportamiento de la resistividad eléctrica es la transformación de yeso a anhidrita en el sitio, así la respuesta de la resistividad eléctrica será mayor cuando el contenido de anhidrita aumenta en los sedimentos. Debido a que el yeso es un sulfato de calcio con dos moléculas de agua ( $CaSO_4$ ), la estructura cristalina de este material se conforma por capas paralelas separadas por moléculas de agua, además de cadenas alternadas con iones  $Ca^{2+}$  y grupos  $SO_4^{2+}$ . El yeso aparentemente es un material no conductivo ya que no presenta porosidad (< 1%); ni agua intersticial, debido a que son rocas impermeables. Sin embargo, las moléculas de agua entre las capas actúan como niveles que conducen electricidad, mientras que las capas de sulfato cálcico son resistivas. Es posible que algunos yesos de la parte inferior de la secuencia sedimentaria se transformaron a anhidrita debido las condiciones climáticas del Pleistoceno Tardío (aproximadamente 28,380 años a. P.), por lo que la pérdida de las moléculas de agua se reflejara en el perfil geoelectrico como un aumento en la resistividad eléctrica a partir de los dos metros de profundidad.

En el caso de rocas clásticas y detríticas, la resistividad también aumenta con respecto al tamaño de la partícula (Tabla 5). La respuesta de materiales arcillosos (1-50 [ $\Omega \cdot m$ ]) será menor que el caso de limos (10-10<sup>2</sup> [ $\Omega \cdot m$ ]). La textura de la secuencia sedimentaria presente en este trabajo de investigación, se realizo a partir de la observación en campo

encontrando que el tamaño de las partículas corresponde a limos, además de contar con presencia de lentes de yeso de manera abundante (Unidad 3). Puede que se haya cometido un error en la estimación de la textura durante la observación de campo, y que los sedimentos presentes en la última parte de la secuencia tengan un mayor contenido de arcillas a comparación de los limos explicando los bajos valores de resistividad eléctrica.

*Tabla 5 Correspondencia entre resistividad eléctrica y textura de los sedimentos detríticos no consolidados (Tapias et al. 2005)*

Sedimento	% de arcilla	Resistividad
Grava	3	500-1000
Arena	5	50-100
Arena limosa	10	50-100
Limo	15	300-500
Limo arenoso	20	25-30
Arcilla arenosa	30	15-25
Arcilla limosa	45	10-15
Arcilla	65	5-10

Otra explicación a los bajos valores de resistividad en la zona puede deberse al contenido de agua presente en los sedimentos, este fluido será responsable de la solubilidad de las rocas evaporíticas, así como el grado de saturación de estas. En el caso de los yesos la solubilidad se encuentra en función de la temperatura, a su vez esta roca se disolverá de 3 a 4 veces más cuando el agua tenga una concentración de cloruro sódico. La porosidad, fisuras o la interposición de materiales influirán en la solubilidad de este material. En el caso del yeso lenticular, megacristalino y otras variaciones asociadas a proporciones de lutitas, margas y materiales carbonatados presentarán alta porosidad, permitiendo así el paso de flujo de agua. Esta acción causará que el proceso de disolución actúe rápidamente y ataque a la roca convirtiéndola así en material polvoriento denominado “limo yesífero” (Mandado et al. 2013). La descripción antes mencionada corresponde con la textura presente a lo largo de la trinchera. La disolución del yeso, así como de los cloruros y carbonatos provocará que el agua tenga un alto contenido iónico, haciendo que la conductividad eléctrica de la zona aumente y por ende la resistividad eléctrica baje, tornándose en valores que van de 1 a 85 [ $\Omega \cdot m$ ].

### Conclusiones y Recomendaciones

Se analizó el comportamiento de la resistividad eléctrica entre el arreglo Wenner y las concentraciones de cloruros y sulfatos. Se eligió este arreglo debido a su sensibilidad, ya que este resulta conveniente para la detección de capas horizontales. El alcance a profundidad que se logró mapear utilizando la técnica de TRE y el arreglo Wenner fue de 3 m, coincidiendo con la longitud máxima de la trinchera realizada en la cuenca de Sandia (Nuevo León), esta se dividió en 3 unidades sedimentológicas. No fue posible realizar una correlación entre el perfil geoelectrico y las primeras dos unidades, ya que el grosor total de estas es menor a 1 m (62 cm). Por lo que la correlación se vio restringida a la Unidad 3 con los sedimentos correspondientes entre las profundidades 300-62 cm.

Con respecto al registro de sales minerales (evaporitas), se observa una relación inversa entre las abundancias de cloruros y sulfatos con diferencias pequeñas. La unidad 3 se dividió en dos partes, debido al comportamiento de las evaporitas. En el caso de los cloruros, el primer tramo (300-195 cm) tiene un promedio de 0.11 % y el segundo tramo (195 -72 cm) registra un aumento en la concentración (0.17 %). El registro de sulfatos muestra un mayor contenido (65.97 %) en su primer tramo (300-160 cm) en comparación con el segundo tramo (64.89 %, 160-62 cm).

Se lograron encontrar tres capas eléctricas con un rango de valores que va de 1 a 85 [ $\Omega \cdot m$ ] con la ayuda de la tomografía de resistividad eléctrica. Los valores altos fueron asociados a los sedimentos de las primeras dos unidades sedimentológicas (Unidad 1 y Unidad 2) cercanas a la superficie (62-0 cm). No se logró realizar una correlación entre las abundancias de evaporitas y el perfil geoelectrico. El registro de carbonatos a lo largo de la Unidad 3 mantiene un comportamiento casi constante ( $< 1\%$ ) por lo que no tendrá un efecto en el comportamiento de la resistividad eléctrica. En el caso de los cloruros y sulfatos se presentaron dos tendencias (0.17 % y 0.11%, 64.89 y 65.97 %, respectivamente). Sin embargo debido a que la diferencia entre estas secciones no es significativo se consideró que no contribuirá a la disminución y aumento en la resistividad eléctrica del lugar (capa 2:  $< 9 [\Omega \cdot m]$ ; capa 3: 9 a 47 [ $\Omega \cdot m$ ]).

Estos valores son relativamente menores en comparación con otros depósitos de rocas sulfatadas y yesos. Este comportamiento se asocia al contenido de minerales clásticos combinado con los sulfatos y a la posible transformación de algunos yesos a anhidritas. Otra posible explicación a los valores de resistividad puede deberse a la presencia de material clásticos con un tamaño de partícula más fino (arcillas). Se debe considerar la presencia de los lentes de yesos masivos ya que el tamaño del grano tiene un aporte en el comportamiento de esta propiedad eléctrica. Por último, este comportamiento puede atribuirse a la disolución de las rocas evaporíticas, provocando así un fluido rico en iones. Estos iones aumentarán la conductividad de la zona, lo que explicaría los bajos valores de resistividad eléctrica de la zona que van de 1 a 85 [ $\Omega \cdot m$ ].

En este trabajo se demostró que la tomografía de resistividad eléctrica es una herramienta útil que puede servir como apoyo para trabajos de paleoclimatología, especialmente en la

ubicación de sitios potenciales de muestreo, ya que ofrece un panorama general de la zona de estudio. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las unidades sedimentológicas de las trincheras o núcleos (obtenidos a partir de la perforación del subsuelo) con espesores menores a 1 m no se lograron visualizar en el perfil geoelectrico debido a la resolución espacial de la técnica geofísica.

El muestreo puede realizarse a partir de la construcción de una trinchera o bien por medio de la perforación del subsuelo para obtener núcleos. En el caso de una trinchera el alcance a profundidad puede superar los tres metros, esto dependerá del nivel freático de la cuenca y al uso de las técnicas anteriormente mencionadas. Una de las limitantes para el muestreo, será la profundidad de dicho nivel ya que no es posible seguir con la excavación al llegar al a este. El uso de métodos de exploración eléctricos suele ser común para la detección de aguas subterráneas, por lo que se podría realizar una tomografía eléctrica buscando el nivel freático de la zona, tomando en cuenta que si este se encuentra a niveles profundos se perderá resolución espacial con respecto al tamaño de las unidades sedimentarias. Se recomienda realizar una tomografía eléctrica reduciendo la distancia entre la separación de electrodos para estudios con unidades sedimentológicas con un grosor reducido, es decir con profundidades menores a 1 m. En el caso de la perforación del suelo para la obtención de núcleos, la profundidad que se puede alcanzar será mayor ( $> 10\text{ m}$ ). Para este tipo de muestreo, resultara conveniente utilizar la tomografía eléctrica utilizando los arreglos Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo, debido a su profundidad de investigación.

La clasificación textural de la trinchera se hizo por medio de la observación de los sedimentos en campo. Esta técnica cualitativa no resulto conveniente para este trabajo debido a que la percepción del tamaño de partícula dependerá de la persona que realizo el estudio. Por lo se recomienda una separación de los sedimentos de las muestras por medio de un tamizado. Con esto, se tendrá un mayor control acerca del tamaño dominante de las partículas y se podrá entender como este factor influye en este tipo de trabajos. Por otro lado, ya que otra posible explicación a los valores de resistividad eléctrica es la transformación de yeso a anhidrita y a la presencia de material clástico resultaría conveniente realizar un análisis con un difractor de rayos X (DRX) para conocer qué la composición de los minerales que conforman la secuencia sedimentaria, así como la proporción de estos. Al tener estos datos de manera cuantitativa se tendrán más elementos para realizar una correlación entre estos factores y las propiedades eléctricas de la zona, mejorando así la aplicación de la tomografía de resistividad eléctrica para este tipo de trabajos.

## BIBLIOGRAFIA

Arias-S, M. E., 2002. La prospección geoelectrica y electromagnética en dos dimensiones y su aplicación en la hidrogeología. *Revista Geológica de América Central*. 27, 21-26.

Ballesteros-Barrera, C., Pavón, N. P., Sánchez-Rojas, G., 2011. Cambio climático: aproximaciones para el estudio de su efecto sobre la biodiversidad. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Pachuca, Hidalgo, México. 120 p.

Beléndez, A., 2008. La unificación de luz, electricidad y magnetismo: “la síntesis electromagnética” de Maxwell. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 30, 1-20.

Boggs Jr, S., 2014. *Principles of sedimentology and stratigraphy*. Pearson Education. Upper Saddle River, New Jersey. 662 p.

Chávez-Cabello, G., Torres-Ramos, J. A., Vázquez, P., Damián, N., Cossio-Torres, T., Aranda-Gómez, J. J., 2011. Evolución estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental en el Cañón Santa Rosa, Linares, Nuevo León. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(2), 253-270.

De Antuñano, S. E., Aranda-García, M., Marrett, R., 2000. Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la Sociedad Geological Mexicana.*, 53, 1-26.

Glover, P. W., Hole, M. J., Pous, J., 2000. A modified Archie’s law for two conducting phases. *Earth and Planetary Science Letters*, 180 (3-4), 369-383.

Guinea, A., Playà, E., Rivero, L., Himi, M., 2010. Electrical resistivity tomography and induced polarization techniques applied to the identification of gypsum rocks. *Near Surface Geophysics*, 8(3), 249-257.

Guinea, A., Playà, E., Rivero, L., Himi, M., Bosch, R., 2010. Geoelectrical classification of gypsum rocks. *Surveys in geophysics*, 31(6), 557-580.

Guinea, A., Playà, E., Rivero, L., Ledo, J. J., Queralt, P., 2012. The electrical properties of calcium sulfate rocks from decametric to micrometric scale. *Journal of Applied Geophysics*, 85, 80-91.

Gutiérrez-Ginés, M., Ranz, I., 2010. Utilización de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X para el estudio de metales pesados en suelos: puesta a punto y aplicación a vertederos. En Sánchez-Hernández A. J. (Ed.), *Estudio multidisciplinar de vertederos sellados: caracterización y pautas de recuperación* (p 109-120). España: Universidad de Alcalá,

Hidalgo, A. L., Loke, M. H., Fanton, G. O., Rubí, E. C., 2010. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía Eléctrica 2D y 3D). 136 p.

- Iakubovskii, I. V., Liajov, L. L., 1980. Exploración eléctrica. Versión española de la tercera edición rusa. Reverté. Barcelona, España. 421 p.
- INEGI. 1986. Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León. México. 99 p.
- Lugo, E., Playà, E., Rivero, L., 2008. Aplicación de la tomografía eléctrica a la prospección de formaciones evaporíticas. *Geogaceta*, 44, 223-226.
- Mandado, J., Vidal, J. R., Tena, J. M., 2013. La disolución de rocas evaporíticas: un importante factor geomorfológico en el Valle del Ebro. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 10, 139-148.
- Martínez, N., Guinea-Maysounave, A., Playà i Pous, E., Rivero-Marginedas, L., 2013. Estudio de viabilidad de canteras de yeso mediante tomografía eléctrica. *Rocas y minerales*, 41(495), 20-25.
- Merla-Rodríguez, G., 1990. Nuevo León: geografía regional. Nuevo León, México. Universidad Autónoma de Nuevo León: Centro de Información de Historia General Regional. 135 p.
- Menke, W., 2018. *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory (third edition)*. Academic press. 352 p.
- Miralles, A. A., 1970. *Sedimentología: Del proceso físico a la cuenca sedimentaria (Vol. 46)*. Editorial CSIC. Madrid, España. 1287 p.
- Montalvo-Arrieta, J. C., Ramos-Zúñiga, L. G., Navarro de León, I., & Ramírez-Fernández, J. A., 2011. Una aproximación a la regionalización sísmica del estado de Nuevo León, basada en velocidades de propagación de ondas de corte y evidencias geología. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(2), 217-233.
- Orellana, E., 1972. *Prospección geoelectrica en corriente continua. Segunda edición*. Paraninfo. Madrid, España. 569 p.
- Padilla, R. J., Reyes, J. M., Ramírez, C., Longoria, J. F., Salazar, L. M. M., Patiño, M., Tardy, M., 1975. Observaciones generales sobre la estructura de la Sierra Madre Oriental: la aloctonía del conjunto cadena alta-altiplano central, entre Torreón, Coah. y San Luis Potosí, S.L.P. México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 75(1), 1-11.
- Palacky, G. J., 1988. Resistivity characteristics of geologic targets. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 1, 53-129.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage research*, 83(2), 173-193.
- Sanín, C. E., Guarupe, L. A. B., 2000. Tomografía geoelectrica: dos ejemplos en la Sabana de Bogotá. *Geofísica Colombiana*, 4, 73-78.

Tapias, J. C., Himi, M., Casas, A., 2005. Estimación de la distribución espacial de las propiedades texturales de los suelos por tomografía eléctrica: Principios y Aplicaciones. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, 7, 191-196.

Temer, H., Cherchali, R., 2018. Caractérisation des épaisseurs des argiles par les méthodes sismique et électrique. Tesis de Maestría. Université Djalali Bounaâma de Khemis Miliana. Argelia, 53 p.