



# BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería  
Colegio de Ingeniería Geofísica

## *Estudio geofísico de estructuras asociadas al ascenso de fluidos mineralizantes en “Las Salinas”, contacto Cuicateco-Zapoteco, sur de la Falla Oaxaca*

T e s i s

Para obtener el grado de:  
**Licenciatura en Ingeniería Geofísica**

Presenta:  
**José Emiliano Calleja Yescas**

Director Interno:

**M. C. José  
Serrano Ortiz**

Director Externo:

**Dra. María de los Ángeles  
Ladrón de Guevara Torres**

Puebla, Puebla. Mayo de 2025.



**BUAP**

Oficio No. SAC/0802/2025

**C. José Emiliano Calleja Yescas -201629506-  
Pasante de la carrera de Ingeniería  
Geofísica  
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de esta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**“ESTUDIO GEOFÍSICO DE ESTRUCTURAS ASOCIADAS AL ASCENSO DE FLUIDOS MINERALIZANTES EN  
«LAS SALINAS», CONTACTO CUICATECO-ZAPOTECO, SUR DE LA FALLA OAXACA”**

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Director de Tema al Mtro. José Serrano Ortiz.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente  
“Pensar bien para vivir mejor”  
H. Puebla de Z. a 19 de mayo de 2025

M. I. Angel Cedilio Guerrero Zamora  
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv  
C.c.p. Archivo

Facultad  
de Ingeniería

Bldv. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**  
**Director de la Facultad de Ingeniería**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**P r e s e n t e.**

El que suscribe: Mtro. José Serrano Ortiz, director del tema de tesis

**“ESTUDIO GEOFÍSICO DE ESTRUCTURAS ASOCIADAS AL ASCENSO DE FLUIDOS MINERALIZANTES EN «LAS SALINAS», CONTACTO CUICATECO-ZAPOTECO, SUR DE LA FALLA OAXACA”**

Presentada por el C. José Emiliano Calleja Yescas -201629506-, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/0802/2025 con fecha de emisión 19 de mayo de 2025, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

**A t e n t a m e n t e**  
**“Pensar bien, para vivir mejor”**  
**H. Puebla de Z. a 03 de junio de 2025**



**Mtro. José Serrano Ortiz**  
**Director de Tema**

**M'JSO/barv**  
**C.c.p. Archivo**

*“Considero más valiente al que conquista sus deseos que al que conquista a sus enemigos, ya que la victoria más dura es la victoria sobre uno mismo”.*

**-Aristóteles de Estagira**

## **Dedicatoria**

Quiero dedicar esta tesis a las personas que más amo y quiero en este mundo. A mí madre Narda que me dio la vida y por ser a la mujer que me ha amado antes de conocerme. A mi padre Netza por el aliento que me brinda siempre en la vida. A mi hermana Nathalie y tía Yesenia, por estar siempre a mi lado y que me han servido como inspiración para salir adelante. A Buster por estar conmigo siempre.

Los amo y los quiero mucho.



## Agradecimientos

Quiero agradecer a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, la máxima casa de estudios por brindarme un hogar para estudiar tan bella carrera.

A la Facultad de Ingeniería por todo lo aprendido dentro y fuera de sus aulas. A cada uno de mis profesores y colegas geofísicos, cada uno sumó a mi formación personal y académica. A mis sinodales y director el Mtro. José Serrano, que me ayudaron con la revisión de este proyecto.

Agradezco al CIIDIR Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional por haberme abierto las puertas a sus instalaciones y mostrarme el camino de mis aspiraciones; la experiencia adquirida, por brindarme el material primario para la elaboración de este trabajo. Con gran afecto y profunda admiración agradezco a la Dra. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres, al Dr. Salvador Belmonte Jiménez, Dr. Omar Delgado Rodríguez y el Dr. Mauro Espinoza Ortiz por su entusiasmo, paciencia y conocimiento en la presente tesis; por demostrarme que con trabajo en equipo; esfuerzo y dedicación se pueden lograr grandes metas. Agradezco profundamente el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, todas y cada una de sus sugerencias fueron muy importantes para el enriquecimiento de esta tesis y aprendizaje.

Agradezco a mis padres Narda Yescas y Netzahualcóyotl Calleja por construirme, creer en mí, motivarme y comprenderme; el cariño que me han brindado, pero sobre todo por el gran sacrificio que han realizado en sus vidas para darnos a mi hermana y a mí la formación que tenemos. Muchas gracias por todo mamá y papá, porque sin ustedes yo no estaría escribiendo el día de hoy estas líneas.

Agradezco a mis amigos por estar conmigo, las risas y compañía; a Buster mi perro por cambiar mi vida, a mi familia. Agradezco a mi Donají por acompañarme durante todo este tiempo, ser parte importante de este proyecto, quererme y apoyarme siempre. Agradezco a mis tíos Areli y Geraldo Alcántara por enseñarme a explorar la naturaleza, por haber sido siempre un apoyo y ejemplo de trabajo duro. Si no fuera por todos ellos, hoy no estaría en el punto en el que me encuentro, porque la afición por admirar pequeñas rocas y piedras fue lo que marcó mi vida; último y no menos importante gracias a mí por tener el espíritu de lograr las cosas. Gracias

## Resumen.

Con el fin de obtener características geofísicas-geológicas que contribuyan a la descripción del arreglo existente en el subsuelo relacionadas a la surgencia de aguas mineralizantes se aplicaron métodos geofísicos indirectos o no destructivos de magnetometría terrestre y resistividad geoelectrica mediante sondeos eléctricos verticales en las zona de “Las Salinas” en San Pablo Etla, al norte de la ciudad de Oaxaca. Las estructuras mineralizadas se localizan en el plano de la Falla Oaxaca, en el contacto geológico profundo de terrenos metamórficos antiguos que forman el basamento casi en su totalidad en el estado de Oaxaca. Considerando la complejidad geológica se asociaron las anomalías magnéticas observadas a los eventos de actividad ígnea cercanos al Cinturón Milonítico con la migración de fluidos cargados de minerales que se transportan entre el bloque sedimentario, rocas extrusivas y el basamento metamórfico. Esto sirvió de referencia para elaborar un perfil o modelo geofísico-geológico con los datos de anomalías residuales o de efectos locales procesados que permitieron la correlación de estructuras. El modelado geológico a partir de datos geofísicos corroboró la presencia de unidades geológicas contrastantes en contacto que son afectadas por múltiples fallas y posibles cuerpos intrusivos con orígenes profundos.

## **Abstract.**

In order to obtain geophysical and geological characteristics that contribute to the description of the existing subsurface arrangement related to the emergence of mineralized waters, indirect or non-destructive geophysical methods were applied, including ground magnetometry and geoelectrical resistivity through vertical electrical soundings in the area of “Las Salinas” in San Pablo Etla, north of the city of Oaxaca. The mineralized structures are located along the Oaxaca Fault plane, at the deep geological contact of ancient metamorphic terrains that constitute nearly the entire basement of the state of Oaxaca. Considering the geological complexity, the observed magnetic anomalies were associated with igneous activity events near the Mylonitic Belt and with the migration of mineral-laden fluids transported through the sedimentary block, extrusive rocks, and metamorphic basement. This served as a reference for developing a geophysical-geological profile or model based on processed residual or local-effect anomalies, which enabled the correlation of structures. Geological modeling based on geophysical data confirmed the presence of contrasting geological units in contact, affected by multiple faults and possible deep-origin intrusive bodies.

## Índice.

|                                                       |      |
|-------------------------------------------------------|------|
| Dedicatoria .....                                     | I    |
| Agradecimientos.....                                  | II   |
| Resumen.....                                          | III  |
| Abstract.....                                         | IV   |
| Índice.....                                           | V    |
| Índice de ilustraciones.....                          | VIII |
| Índice de ecuaciones.....                             | XI   |
| Índice de tablas.....                                 | XII  |
| 1. Capítulo 1. Introducción.....                      | 1    |
| 1.1 Planteamiento del problema .....                  | 1    |
| 1.2 Justificación .....                               | 2    |
| 1.3 Objetivo general.....                             | 3    |
| 1.4 Objetivos específicos.....                        | 3    |
| 2. Capítulo 2. Descripción de la zona de estudio..... | 4    |
| 2.1 Información geográfica.....                       | 4    |
| Localización del sitio: Falla Oaxaca.....             | 4    |
| 2.2 Hidrografía.....                                  | 6    |
| Aspectos hidrogeológicos.....                         | 8    |
| 2.3 Marco geológico.....                              | 10   |
| 2.3.1 Antecedentes geológicos.....                    | 10   |
| 2.3.2 Estratigrafía y Litología .....                 | 13   |
| 2.3.3 Marco tectónico y geología estructural .....    | 14   |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.3.1 Contacto: Zapoteco-Cuicateco (Cinturón de milonitas) .....                      | 15 |
| 2.3.3.2 Terrenos tecnoestratigráficos de México .....                                   | 16 |
| Terreno Zapoteco.....                                                                   | 19 |
| Terreno Cuicateco.....                                                                  | 20 |
| 3. Capítulo 3. Marco Teórico.....                                                       | 21 |
| Estado del arte.....                                                                    | 21 |
| Geofísica de la Falla Oaxaca.....                                                       | 21 |
| 3.1 Ciclo de las rocas.....                                                             | 24 |
| 3.2 Propiedades físicas de las rocas metamórficas. ....                                 | 25 |
| 3.3 Conceptos básicos del electromagnetismo.....                                        | 30 |
| 3.4 Propiedades magnéticas y eléctricas de las rocas.....                               | 41 |
| 3.4.1 Geoelectricidad .....                                                             | 41 |
| 3.4.2 Geomagnetismo.....                                                                | 42 |
| 3.5 Fundamentos teóricos de la geofísica de superficies y los métodos potenciales. .... | 48 |
| 3.5.1 Prospecciones geofísicas. ....                                                    | 49 |
| 3.5.1.1 Método magnético.....                                                           | 49 |
| 3.5.1.2 Método eléctrico. ....                                                          | 52 |
| 3.5.2 Tratamiento y filtrado de datos geofísicos. ....                                  | 57 |
| 3.5.2.1 Método magnético.....                                                           | 57 |
| Anomalía magnética y separación residual-regional .....                                 | 59 |
| Aplicación de filtros. ....                                                             | 62 |
| Cálculos de profundidad mediante el espectro radial de potencia .....                   | 64 |
| 3.5.2.2 Método eléctrico. ....                                                          | 68 |
| 4. Capítulo 4. Metodología y procesamiento.....                                         | 70 |
| 4.1 Planificación de adquisición de datos en campo.....                                 | 70 |
| 4.2 Campaña de prospecciones geofísicas. ....                                           | 75 |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3 Procesamiento de los datos geofísicos.....                             | 78  |
| Reducción y procesamiento de datos magnéticos.....                         | 78  |
| Reducción y procesamiento de datos geoelectricos.....                      | 85  |
| 5. Capítulo 5. Resultados.....                                             | 87  |
| Reducción al polo.....                                                     | 88  |
| Derivadas.....                                                             | 90  |
| Señal Analítica .....                                                      | 91  |
| Estimación de profundidades a partir del espectro radial de potencia ..... | 93  |
| Resultados de los sondeos eléctricos verticales .....                      | 96  |
| Modelado directo a partir de datos magnéticos de efecto local .....        | 100 |
| 6. Capítulo 6. Conclusiones generales. ....                                | 103 |
| 7. Bibliografía y referencias .....                                        | 106 |
| 8. Anexos.....                                                             | 114 |
| 9. Reporte fotográfico. ....                                               | 130 |

## Índice de ilustraciones.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. Mapa de localización del sitio de estudio.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 4  |
| Ilustración 2. Flujos emergentes mineralizantes en Las Salinas. Fotografías en campo de la zona de estudio. 2023. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 5  |
| Ilustración 3. Microcuencas de interés y escorrentías principales de la zona de estudio (contornos amarillos), mostrando la Falla Oaxaca, con orientación E-O en color rojo. Imagen tomada y modificada de Google Earth el 20/01/2023.....                                                                                                                                                                                                                                  | 7  |
| Ilustración 4. Mapa Hidrológico del sitio de estudio sobre el MED con relieve.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 8  |
| Ilustración 5. Macroreferenciación de los sitios mineralizados en la carta geológica regional E14-9. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 12 |
| Ilustración 6. Mapa geológico local digitalizado de la carta geológica minera 1:50,000 E14-D47 del SGM. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 12 |
| Ilustración 7. Sección transversa B. Modificado de la Carta Geológica-Minera Regional de Oaxaca del SGM 1:250000. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 16 |
| Ilustración 8. Terrenos tectonoestratigráficos en México de acuerdo con (Ortega-Gutiérrez, 1981a). M: Terreno Mixteco. CU: Terreno Cuicateco. Z: Terreno Zapoteco. TMVB: Cinturón Volcánico Transmexicano. Modificado de (Sedlock et al., 1993). ....                                                                                                                                                                                                                       | 18 |
| Ilustración 9. Sección plana de las líneas de campo eléctrico que salen de un punto cargado: (a) carga unitaria positiva, (b) carga unitaria negativa, (c) dos cargas iguales positivas y (d) dos cargas positivas iguales. Sección plana de las líneas de campo eléctrico que salen de un punto cargado: (a) carga unitaria positiva, (b) carga unitaria negativa, (c) dos cargas iguales positivas y (d) dos cargas positivas iguales. Modificado de (Lowrie, 2007). .... | 32 |
| Ilustración 10. Características de las líneas de un dipolo magnético alrededor de: a) una barra magnética pequeña, b) un tubo pequeño que lleva una corriente eléctrica y c) una esfera uniformemente magnetizada. Modificado de (Lowrie, 2007). ....                                                                                                                                                                                                                       | 35 |
| Ilustración 11. Distintos comportamientos de la materia. Flecha negra H (campo magnético aplicado) y flecha azul M (magnetización adquirida). A) Diamagnetismo. B) Paramagnetismo. C) Ferromagnetismo. D) Antiferromagnetismo. E) Ferromagnetismo. Modificado de Tarling, 1993. ....                                                                                                                                                                                        | 39 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Ilustración 12. Definición de los elementos geomagnéticos. Componentes cartesianas norte (X), este (Y) y verticalmente hacia abajo (Z), o mediante los ángulos de declinación (D) e inclinación (I) junto con la intensidad total del campo F. ....                                                                                                                                        | 45        |
| Ilustración 13. Configuración general de 4 electrodos para mediciones de resistividad. Consiste en un par de electrodos de corriente (AB) y un par de electrodos de potencial (CD). Modificado de Lowrie (2007).....                                                                                                                                                                       | 54        |
| Ilustración 14. Esquema de arreglo Schlumberger. Modificado de Lowrie (2007).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 55        |
| Ilustración 15. Esquema de representación de una anomalía magnética en latitudes medias debido a una magnetización. a) Campo inducido a 60°. b) Perfil de anomalía. Modificado de Milsom (1996). ....                                                                                                                                                                                      | 61        |
| Ilustración 16. Hoja ejemplo para el registro de datos en SEVs en campo. Tomado de (Iris Instruments, 2003). ....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 68        |
| Ilustración 17. Construcción de una curva de resistividad en arreglo Schlumberger al sobreponer los segmentos de curva obtenidos con diferentes separaciones de electrodos de potencial. ....                                                                                                                                                                                              | 69        |
| <i>Ilustración 18. Ubicación de los perfiles geofísicos en la zona de estudio. Líneas rojas: lineamientos magnéticos proyectados. Líneas blancas: Falla Oaxaca de la cartografía SGM. Línea magenta: Cizalla San Pablo. Línea Morada: Perfil geoeléctrico. Líneas azules: escurrimientos. Imagen tomada y modificada de Google Earth el 20/01/2023. Datos vectoriales INEGI 2020. ....</i> | <i>70</i> |
| Ilustración 19. Equipo de magnetométrico protónico terrestre de Geometrics G-856 proporcionado por el IPN CIIDIR Oaxaca, utilizado para las lecturas en campo de este trabajo. 2023. ....                                                                                                                                                                                                  | 72        |
| Ilustración 20. Equipo de prospección eléctrica ensamblado y proporcionado por el IPN CIIDIR Oaxaca, utilizado para las lecturas en campo de este trabajo. 2023.....                                                                                                                                                                                                                       | 73        |
| Ilustración 21. Mapa recorte del sitio de levantamiento magnético y geoeléctrico en la zona de estudio con vista hacía el sur. Marcadores blancos: estación de lectura con magnetómetro. Líneas rojas: lineamientos magnéticos proyectadas. Líneas blancas: Falla Oaxaca de la cartografía SGM. ....                                                                                       | 75        |
| Ilustración 22. Fotografías en campo en el primer sitio SEV 1. Tendido realizado sobre la avenida que es la colindancia/límite entre Viguera y San Pablo. 2023. ....                                                                                                                                                                                                                       | 77        |
| Ilustración 23. Fotografías en campo del segundo sitio de sondeo SEV 2. El tendido se realizó sobre la vereda/camino entre parcelas y terrenos de cultivo. 2023. ....                                                                                                                                                                                                                      | 77        |



|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ilustración 24. (1) Grafica de variación de lecturas de la base magnética del primer día /  |     |
| (2) Grafica de variación de lecturas de la base magnética del segundo día. ....             | 79  |
| Ilustración 25. Valores para el cálculo de IGRF. ....                                       | 80  |
| Ilustración 26. Recorte de la base de datos creada para el proyecto en el software Oasis    |     |
| Montaj 6.4.2. de Geosoft Inc. ....                                                          | 80  |
| Ilustración 27. Perfiles de anomalía magnética y elevación topográfica. ....                | 81  |
| Ilustración 28. Representación gráfica de filtro pasa banda. Modificado de (Hinze et al.,   |     |
| 2013). ....                                                                                 | 83  |
| Ilustración 29. Anomalía magnética de la zona de estudio, obtenido al realizar              |     |
| correcciones y sustraer el valor del IGRF. ....                                             | 87  |
| Ilustración 30. Anomalía magnética reducida al polo en la zona de estudio. ....             | 88  |
| Ilustración 31. Anomalía magnética reducida al polo en la zona de estudio interpretado.     |     |
| .....                                                                                       | 89  |
| Ilustración 32. Primera derivada vertical de la anomalía local. ....                        | 90  |
| Ilustración 33. Señal analítica de la anomalía residual. ....                               | 91  |
| Ilustración 34. Mapa de anomalías residuales de la zona de estudio. Compilado en QGIS.      |     |
| Contenido propio. ....                                                                      | 92  |
| Ilustración 35. Gráfico del espectro de potencia generado en Oasis Montaj. ....             | 93  |
| Ilustración 36. Gráfico elaborado para cálculo de pendientes de la línea de tendencia. .... | 94  |
| Ilustración 37. Ubicación de algunos diques y contactos calculados con Werner detphs        |     |
| sobre el mapa de señal analítica. Marcas rojas: contactos. Marcas azules: diques. ....      | 95  |
| Ilustración 38. Curva de resistividad eléctrica para el SEV 1 (1). Modelo realizado con el  |     |
| software DCINV (2). ....                                                                    | 96  |
| Ilustración 39. Curva de resistividad eléctrica para el SEV 2 (1). Modelo realizado con el  |     |
| software DCINV (2). ....                                                                    | 98  |
| Ilustración 40. Modelo geológico-geofísico del perfil A-A' de la anomalía magnética         |     |
| residual. ....                                                                              | 101 |

## Índice de ecuaciones.

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ley de Coulomb para la fuerza eléctrica (1).....                                  | 31 |
| Ecuación para el campo eléctrico (2) .....                                        | 32 |
| Expresión para el potencial eléctrico (3) .....                                   | 33 |
| Ley de Ohm (4) .....                                                              | 33 |
| Ley de Gauss para el magnetismo (5) .....                                         | 33 |
| Ley de Gauss para el campo eléctrico (6).....                                     | 34 |
| Ley de Ampère-Maxwell (7).....                                                    | 34 |
| Ley de Faraday (8) .....                                                          | 34 |
| Ecuación del momento magnético dipolar (9) .....                                  | 36 |
| Fuerza magnética de dos polos (10) .....                                          | 36 |
| Campo de un dipolo generado por una barra magnética (11).....                     | 37 |
| Ecuación constitutiva en el electromagnetismo (12) .....                          | 37 |
| Ecuación de la Intensidad de magnetización (13): .....                            | 38 |
| Relación entre permeabilidad y susceptibilidad magnética (14).....                | 39 |
| Magnitud del potencial geomagnético expresado en coordenadas esféricas (15) ..... | 44 |
| Ecuación de Laplace para la función de campo potencial (16) .....                 | 45 |
| Ecuación de Poisson para la función de campo potencial (17) .....                 | 45 |
| Flujo de campo magnético medido por un magnetómetro (18) .....                    | 52 |
| Ecuación para la resistividad aparente en un arreglo tetraelectrónico (19).....   | 54 |
| Ecuación para el cálculo de la resistividad aparente (20) .....                   | 54 |
| Expresión para lectura de campo magnético (21).....                               | 59 |
| Obtención de anomalía (22): .....                                                 | 60 |
| Expresión armónica del campo (23).....                                            | 60 |
| La transformada de Fourier (24).....                                              | 65 |
| Transformada de Fourier inversa (25).....                                         | 65 |
| Espectro de potencia (26) .....                                                   | 65 |
| Expresión para la densidad de potencia (27) .....                                 | 66 |
| Ensamble de espectro de potencia en un intervalo determinado (28).....            | 66 |
| Expresión para promedio de profundidades de fuentes magnéticas (29) .....         | 67 |

## Índice de tablas.

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Tipos de metamorfismo .....                                                                | 27 |
| Tabla 2. Instrumentación para el levantamiento magnético en campo.....                              | 71 |
| Tabla 3. Parámetros de valores magnéticos en el sitio de adquisición. ....                          | 73 |
| Tabla 4. Instrumentación para el levantamiento de sondeos eléctricos en campo.....                  | 74 |
| Tabla 5. Parámetros de los sondeos eléctricos verticales realizados en la zona de estudio.<br>..... | 74 |
| Tabla 6. Profundidades promedio calculadas por el método de Spector. ....                           | 94 |
| Tabla 7. Valores de moda y media, para las profundidades de diques y contactos<br>geológicos. ....  | 95 |

## **1. Capítulo 1. Introducción.**

La extracción insostenible de las aguas subterráneas por la demanda poblacional en aumento empuja a la sociedad a explorar el subsuelo mediante diferentes técnicas y recursos disponibles para poder abastecer las demandas de agua en sectores nuevos; pudiendo tener propiedades hidrogeológicas no favorables para la explotación.

Los flujos de agua salada cargada de minerales son comunes en diferentes puntos del estado, debido a las condiciones geológicas locales y regionales, pero no todas tienen las mismas implicaciones. Integrar las características geológicas que se hacen presentes con la interpretación de modelos geofísicos permiten identificar estructuras a profundidad de interés, como cuerpos enterrados o estructuras geológicas que pueden tener o no manifestaciones superficiales, teniendo en ocasiones impactos socioambientales sobre las localidades para una mejora en la percepción y administración de los recursos en el subsuelo.

### **1.1 Planteamiento del problema**

Esta investigación se origina de la observación de distintos sitios con mineralizaciones superficiales, con fenómenos geológicos similares en las cercanías de la Falla Oaxaca, pudiéndose tratar de alteraciones hidrogeoquímicas, hidrotermales, hidrotermales amagmáticas que se manifiestan formando estructuras o depósitos minerales que han moldeado por deposición química a lo largo de los años, cavernas de dimensiones distintas, cascadas petrificadas y creado nuevo suelo mineral en escala de afloramiento; ascenso de aguas subterráneas mineralizadas o fluidos mineralizantes a través de las zonas de fallamiento. Similares a los procesos que ocurren en Hierve el Agua; sitio famoso en Oaxaca por sus caídas de agua petrificadas.

Las emanaciones de las aguas mineralizadas emergen principalmente en zonas de debilidad, formando arroyos o infiltrándose en el subsuelo por fracturas o fallas profundas en topografías más bajas nuevamente, para terminar uniéndose al acuífero de Valles Centrales. Las autoridades locales cercanas a la zona de estudio proporcionaron información sobre perforaciones a cielo abierto y pozos profundos realizados por distintos sectores de la población que describen los flujos como “salados” y no apta para el uso

humano; en donde la roca almacenadora o transportadora se torna o recubre por los minerales transportados en el agua de color rojo-cobre-amarillo que pueden tratarse de limonitas o similares a este, que al mismo tiempo despiden un olor y sabor que se describe como “a fierro o metal”, pudiéndose tratar de óxidos y otras especies geoquímicas con metales. De esta manera, considerando lo mencionado en este párrafo; los flujos subterráneos de agua de los que se abastece las poblaciones aledañas son contaminados o alterados en diversos sitios, reduciendo el espacio para la búsqueda del aprovechamiento de este recurso natural en distintas localidades que a su vez modifican el paisaje.

## **1.2 Justificación**

La intrusión de diques graníticos profundos que se encuentran aflorando en la zona norte del Valle de Etla pueden estar relacionados al aporte de minerales a los flujos subterráneos de acuerdo con las descripciones de los arreglos tectónicos y actividad ígnea en la región realizadas por Flores *et al* (2001) y Ortega *et al* (2003), debido a la cercanía a la zona de estudio. En la actualidad no existe bibliografía o estudios relacionados a los fenómenos de mineralización que ocurren en la zona. La literatura recopilada no aborda o mencionan la presencia de estos flujos hídricos mineralizados que modifican el paisaje local; a pesar de los estudios realizados con relación a la identificación de los bloques metamórficos y de la dinámica y geometría de la Falla Oaxaca. Las filtraciones de los fluidos podrían estar afectando la composición del suelo y la calidad de las aguas que abastecen las poblaciones. Estas alteraciones se encuentran en el paso de escurrimientos importantes que llegan a formar parte de la cuenca del Río Atoyac, es decir, modifican sus propiedades hidroggeoquímicas al infiltrarse al acuífero a través de las fracturas y fallas que existen en los alrededores de la Falla Oaxaca, teniendo en cuenta además que esta porción sur de la falla termina o “desaparece” en área de los Valles Centrales de Oaxaca de acuerdo con distintos autores; que a su vez atraviesa comunidades.

Es por esto, que la magnetometría terrestre y sondeos eléctricos propuestos como metodología de estudio en esta zona brinda nuevos datos que impulsan a describir los posibles procesos que intervienen en la surgencia de agua mineral o salinizada a través

del conjunto de fallas aportando sales y metales como el Bario al acuífero de la Ciudad de Oaxaca y del que se abastecen las comunidades circundantes que principalmente es a través de pozos a cielo abierto o norias en el ambiente de la evolución tectónica y volcánica en el sureste de México y la reactivación de la Falla Oaxaca.

Con base en lo anterior, los estudios en conjunto tratan actividades enfocados a la geofísicos adquiridos *in situ* podemos obtener información permitiendo elaborar una hipótesis sobre la arreglo geológico-estructural o posibles cuerpos intrusivos y, si estos modifican los flujos subterráneos de consumo. Finalmente, los resultados pueden enfocarse a proveer precedentes para la correcta exploración del subsuelo para el aprovechamiento hídrico.

### **1.3 Objetivo general.**

- Caracterizar el subsuelo a partir de la interpretación integrada de los datos geofísicos magnéticos terrestres y geoelectrónicos adquiridos en "Las Salinas", con el fin de comprender los mecanismos estructurales que controlan el ascenso de fluidos mineralizantes.

### **1.4 Objetivos específicos.**

- Procesar los datos magnéticos mediante filtros geofísicos como la señal analítica y las derivadas direccionales en Oasis Montaj para delimitar las fuentes responsables de las anomalías.
- Obtener las profundidades de las fuentes causantes de anomalías magnéticas en la zona de estudio mediante el método de análisis espectral propuesto por Spector y Grant (1973).
- Generar un perfil geológico-geofísico a través del modelado directo de la anomalía magnética residual y la elevación para correlacionar al ascenso de fluidos minerales.

## 2. Capítulo 2. Descripción de la zona de estudio.

### 2.1 Información geográfica.

#### Localización del sitio: Falla Oaxaca.

Los puntos de surgencia se sitúan sobre el plano de la Falla Oaxaca, en el contacto estratotectónico a profundidad de dos terrenos, ubicadas en la parte sur-oriental del Valle de Etla, en las laderas o flancos del Complejo Milonítico, con una altitud media de 1500 y 2500 msnm. Particularmente los fenómenos de interés se manifiestan o afloran formando suelo mineral recubriendo las formaciones rocosas, ubicados en el mapa de la ilustración 1. Los recubrimientos minerales se aprecian color blanco en campo, mientras que los flujos activos en un color amarillo-rojizo; asumiendo el transporte de metales u óxidos como puede verse en la ilustración 2. “Las Salinas” son estructuras naturales denominadas así por la población, se forman o manifiestan en campo sobre los afloramientos de rocas metamórficas; al ver ilustración 5 se aprecia en el mapa geológico local el arreglo estructural presente para la zona.

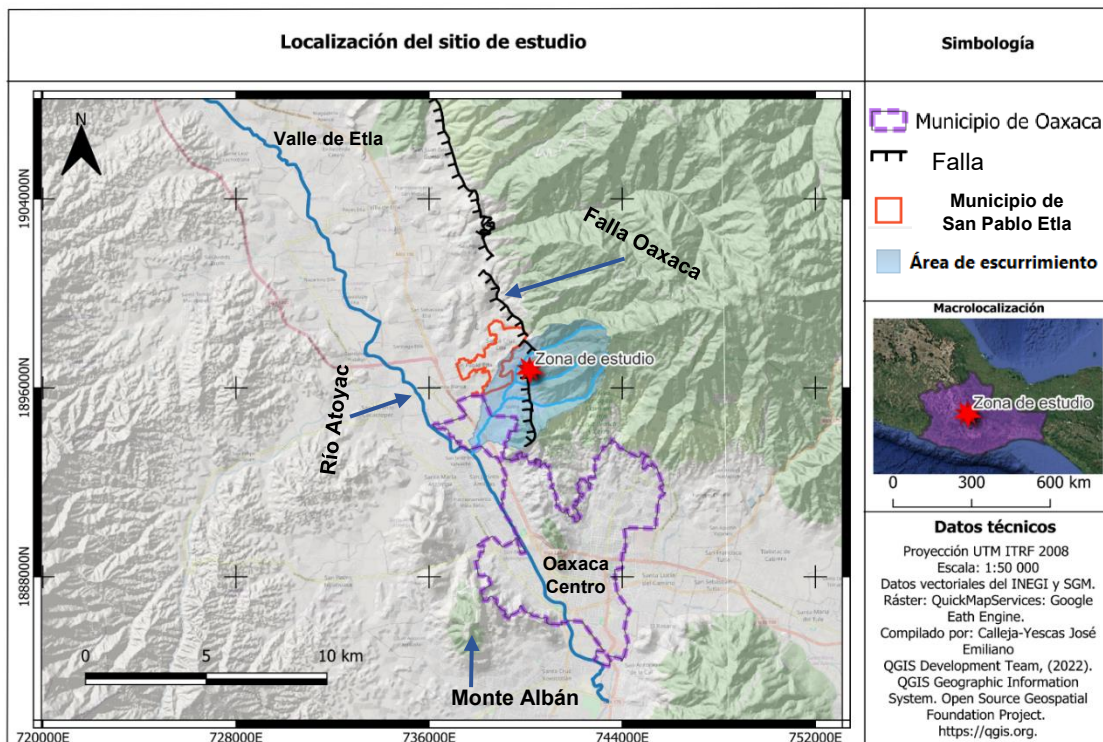


Ilustración 1. Mapa de localización del sitio de estudio.



*Ilustración 2. Flujos emergentes mineralizantes en Las Salinas. Fotografías en campo de la zona de estudio. 2023.*

Sedlock *et al* (1993) describe la presencia del cinturón de milonitas como el límite entre los terrenos Oaxaca-Juárez o Zapoteco-Cuicateco que representan discontinuidades tectónicas que se extienden en la superficie aproximadamente 130 kilómetros en lo que corresponde al estado de Oaxaca. Autores como Campos Enríquez (2013) denominan la región como una zona de sutura debido a su evolución tectónica.

#### Clima.

El INEGI (2008) define el clima de capital oaxaqueña como semiseco semicálido y semicálido subhúmedo con lluvias en verano. La precipitación media anual es de 1550 mm, principalmente con lluvias de junio a octubre. Se consultaron las Normales Climatológicas promedios en periodos de 30 años de los datos que se recopilan en las estaciones meteorológicas. Para visualizar estos datos completos ver anexo 2.

La estación consultada en Oaxaca con clave 20067 abarca un periodo de 30 años de 1991 al 2021. Con las coordenadas 17.08305556 N, 96.70972222 O, a una altura de 1594 msnm. La temperatura media anual del estado es de 22°C. La temperatura máxima



promedio es de 31°C, registrada en los meses de abril y mayo, mientras que la mínima promedio es de 12.5°C, en el mes de enero. De esta manera el promedio de la temperatura máxima al año en la capital de Oaxaca durante 30 años es de 30.8°. Finalmente, la precipitación anual se reporta en 854.4mm.

### Fisiografía.

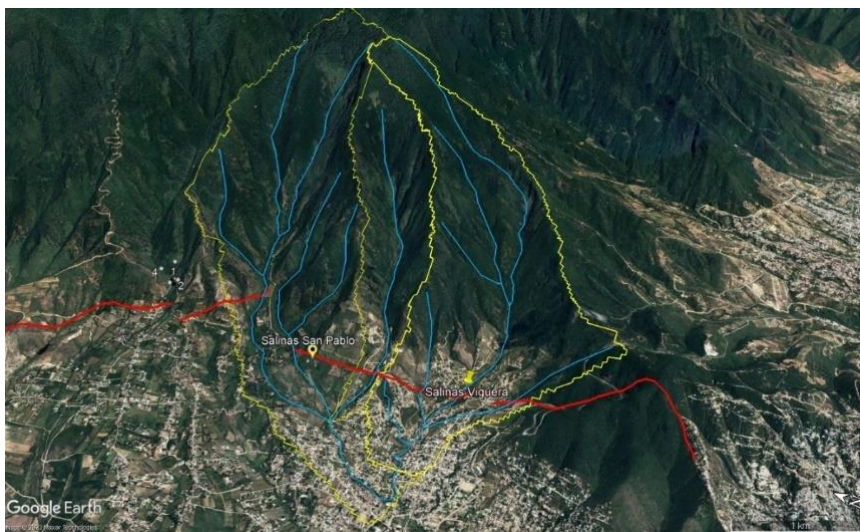
La fisiografía del territorio de Oaxaca pertenece a la provincia de la Sierra Madre del Sur, forma dos terceras partes del occidente del estado. La Sierra Madre del Sur comprende 79.82% del territorio estatal. Se extiende paralelamente a la costa del Pacífico, y está relacionada con la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Norteamericana. (INEGI, 2005).

La zona de estudio se ubica en la provincia de la Sierra Madre del Sur cuyas subprovincias son las Tierras Altas de Oaxaca y las Sierras Plegada del Noreste, representadas en las cartas E14D-9 y E14D-57 de acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (2008). El INEGI (2008), por otro lado, opta por los nombres de subprovincias de las Sierras y Valles y las Sierras Orientales, respectivamente. (ver anexo 1).

## 2.2 Hidrografía.

La CONAGUA (2020) clasifica las aguas superficiales del Estado de Oaxaca que están distribuidas en ocho regiones hidrológicas. La zona de estudio del presente proyecto se ubica en la V Región Hidrológica-Administrativa (RHA) del Pacífico Sur, en la región hidrológica RH20 “Costa Chica-Río Verde”, de la Cuenca del Río Atoyac (RH20A), subcuenca del Río Atoyac-Oaxaca de Juárez (RH20Ac) como se aprecia al ver la ilustración 3; donde la corriente principal en la superficie es el Río Atoyac que fluye en dirección S-SE de tipo exorreica. El Río Atoyac nace cerca de la zona de Etla. En su primer tramo toma una dirección al sureste, hacia la ciudad de Oaxaca donde ingresa a la zona geohidrológica de Zimatlán y pertenece el acuífero que abastece los Valles Centrales (acuífero con clave 2025).

El cinturón milonítico que se eleva hacia la Sierra Juárez en dirección al NE transporta una gran parte del agua sobre el lineamiento de la Falla Oaxaca hacia la cuenca del Atoyac que atraviesa la Ciudad de Oaxaca. Estos escurrimientos tienen un caudal importante debido a las propiedades impermeables de las rocas metamórficas que afloran como milonitas y esquistos, las cuales tienen un coeficiente de escurrimiento más alto que las rocas sedimentarias. Utilizando este coeficiente, se ingresaron parámetros de precipitaciones y periodos de retorno obtenidos del INEGI para un periodo de 30 años en el simulador de aguas de cuencas hidrográficas del INEGI (SIATL), con objetivo de obtener un caudal simulado y conceptualizar las alteraciones de aguas saladas a las escorrentías y flujos subterráneos en los límites de la microcuenca para la sub-subcuenca de Las Salinas que incluye las microcuencas de Viguera y San Pablo Etla, estimando un caudal pico simulado en  $174.64 \text{ m}^3/\text{s}$ . La tala con los valores completos se encuentra en el anexo 3. La ilustración 4 muestra una vista lateral con relieve de los escurrimientos calculados con anterioridad de las microcuencas en la zona de estudio que convergen hacia el valle donde los plegamientos forman estos parteaguas y algunas otras fallas como cizallas que son perpendiculares a la Falla Oaxaca, atravesándola con direcciones E-O.



*Ilustración 3. Microcuencas de interés y escorrentías principales de la zona de estudio (contornos amarillos), mostrando la Falla Oaxaca, con orientación E-O en color rojo. Imagen tomada y modificada de Google Earth el 20/01/2023.*

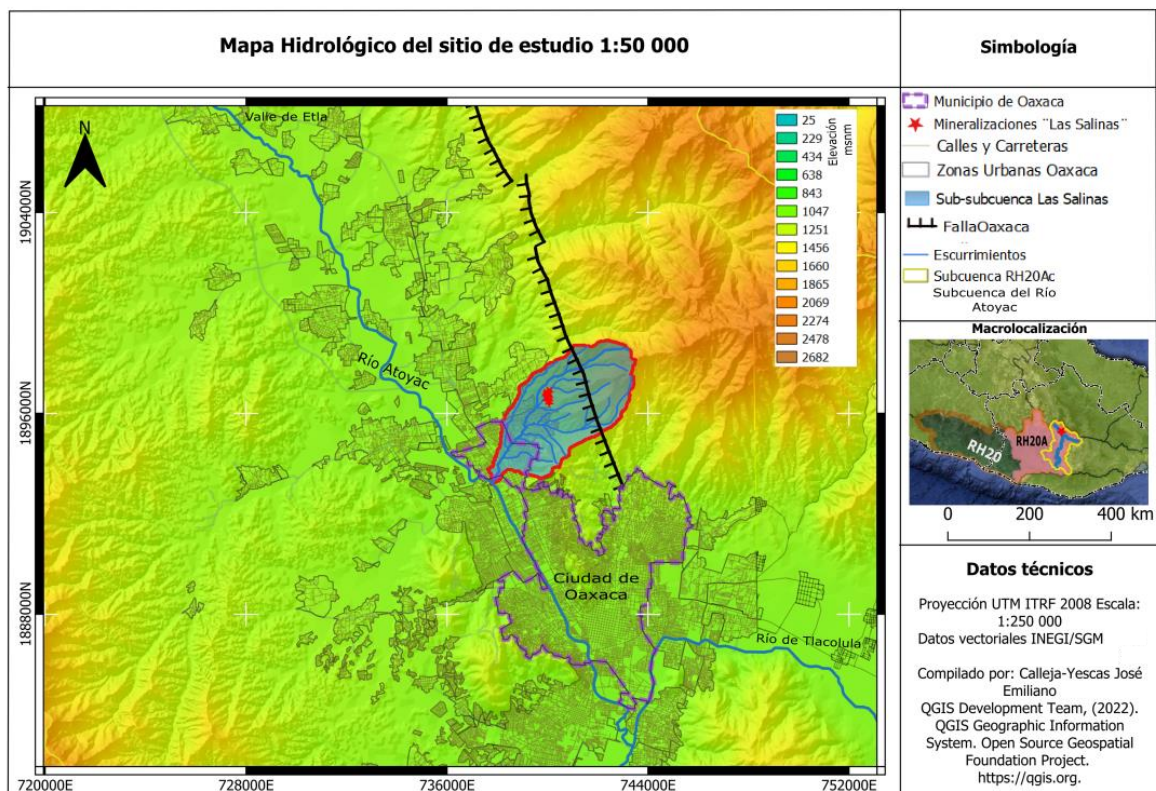


Ilustración 4. Mapa Hidrológico del sitio de estudio sobre el MED con relieve.

## Aspectos hidrogeológicos

El acuífero de Valles Centrales se compone de 3 zonas: Etla, Tlacolula y Zimatlán. Para 1978 se realizaron estudios para determinar las fuentes de abastecimiento del Valle de Oaxaca; en esos estudios se establece que el acuífero en explotación actual está compuesto por una unidad hidrogeológica de material aluvial, funcionando como un acuífero libre. Este material aluvial está constituido por una mezcla heterogénea de arenas, cantos rodados, gravas, arcillas y limos, predominantemente localizados en la porción central de los valles. Su espesor saturado varía significativamente, desde aproximadamente 15 metros hasta 100 metros, adelgazándose hacia los bordes del valle. Por otra parte, el basamento del acuífero está compuesto por rocas metamórficas, con presencia ocasional de calizas y riolitas cortando a través de ellas. Sobre esta base se encuentra una capa de alteración derivada del mismo basamento. Los límites laterales del acuífero están delimitados por materiales impermeables como rocas metamórficas (gneis y esquistos) y rocas volcánicas extrusivas que circundan el valle. Estas rocas,

debido a su grado de fracturamiento, contribuyen también al almacenamiento y flujo subterráneo dentro del acuífero. También se reporta que durante temporadas de lluvia en general se observaron profundidades al nivel estático de 2.0 a 15.0 m, siendo más profundas hacia las márgenes de las sierras y las más someras hacia el centro del valle. El acuífero en la porción de interés en esta investigación correspondiente a la parte noroccidental está constituido por formaciones aluviales que descansan en el basamento metamórfico clasificado como gneiss granítico y esquistos del Complejo Oaxaca, al mismo tiempo definen el agua como químicamente apta para el consumo humano de composición sódico bicarbonatadas de reciente infiltración. (CONAGUA, 2020).

Con fines para la identificación de especies químicas presentes en la zona de estudio se consultan las cartas de levantamientos geoquímicos del SGM (2007a), (2000b), (2007b), (2007f), (2007d), (2007e), (2007c). Se identificaron elementos de interés dentro de la cuenca en los que destacaron la presencia de Bario, Cobre, Zinc, Plomo, Arsénico, Cadmio y Fósforo en escala 1:50000.

Por otra parte, de acuerdo con las características de almacenar y transmitir agua, las unidades del acuífero CONAGUA las clasificó de la siguiente forma:

Complejo Metamórfico: No presenta permeabilidad primaria que permita la circulación de agua subterránea a través de ella y el fracturamiento que se observa en estas rocas se encuentra relleno por material arcilloso, sin embargo, es factible que ese fracturamiento origine una cierta aportación lateral, considerándosele como una unidad poco favorable, es decir de permeabilidad secundaria.

Caliza Teposcolula: Secuencia de calizas en estratos delgados, gruesos y en ocasiones masivas, presentan permeabilidad secundaria debido al fracturamiento y disolución, considerándose una buena permeabilidad.

Grupo Puebla: Areniscas y lutitas calcáreas. Las oquedades desarrollados por disolución y fracturamiento se encuentran rellenos parcialmente por calcita u otro material, calificándolo como permeabilidad baja.

Rocas Volcánicas Terciarias: El fracturamiento presente origina una permeabilidad secundaria que se encuentra en la mayoría de los casos relleno por material de precipitación, sin embargo, en zonas de mayor fracturamiento la unidad puede originar

pequeñas aportaciones de agua subterránea al acuífero, por lo que se clasifica como de permeabilidad baja.

Conglomerado: La permeabilidad de esta unidad depende del tipo de material cementante, de la clasificación de sus fragmentos y del grado de compactación de éstos, por lo que se clasifica como de permeabilidad baja.

Material Aluvial: Este material está constituido por sedimentos poco compactados, de clasificación granulométrica variable formando una mezcla heterogénea de cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas capaz de almacenar y suministrar agua subterránea, por lo que se le considera la más favorable desde el punto de vista hidrogeológico, clasificándosele como de permeabilidad buena.

## **2.3 Marco geológico.**

### **2.3.1 Antecedentes geológicos.**

Los aspectos tectono-geomorfológicos descritos en los que se sustenta la presente investigación son descritos por numerosos científicos durante más de cinco décadas de investigación referente la evolución tectónica y descripción de los terrenos tecnoestratigráficos del sureste de México; fundamentales en la comprensión del arreglo geológico regional y las implicaciones neotectónicas y petrográficas. Mientras que, la síntesis del marco geológico local que se presenta es tomada de las descripciones realizadas en las cartas geológicas-mineras del SGM en (2000a) y (2008), así como de los trabajos en geofísica a lo largo de décadas por dependencias paraestatales e instituciones.

Las anomalías de interés se sitúan cercanas a depósitos de material volcánico de composición andesítica que se hace más acida en dirección hacia el norte. Bordeada y limitada fallas normales y cizallas de grandes extensiones que forman por lomeríos y parteaguas. Además, teniendo en cuenta lo que señala Alaniz-Álvarez *et al* (1994), que el granito de Etna es un evento importante en el escenario local, que facilitó su intrusión debido a que la Falla Oaxaca se estructura por fallas tectónicas profundas, las cuales no son visibles en superficie debido a que están parcialmente cubiertas por estratos o rocas de areniscas-lutitas y areniscas con calizas altamente fracturadas y alteradas.

La región se encuentra dentro de lo que también se considera el límite tectónico sur del Complejo Metamórfico de la Sierra Juárez, formando un graben en el que se encuentran el Valle de Etla, el Valle de la Ciudad de Oaxaca, y se extiende al norte hacia la región de la Cañada, limitado hacia el SE por el Complejo Metamórfico Oaxaqueño. (Belmonte-Jiménez, 2005).

Centeno-García (1988) define la zona de milonitas como el sistema de fallas en el occidente de la Sierra Juárez asociadas al levantamiento de estas montañas en conjunto con la Sierra Mazateca durante el Cenozoico. Esta estructura se desarrolla por el contacto tecnoestratigráficos de los terrenos Zapoteco y Cuicateco en un fallamiento normal que atraviesan desde la región de la Cañada hasta las Sierras y Valles de los estados de Puebla y Oaxaca; con contrastes geológicos y geofísicos que se relacionan a su reactivación. Se extiende con dirección N-NO y se confirma por los perfiles aeromagnéticos realizados por el Consejo de Recursos Minerales (2001) que pueden verse en el anexo 5.

La ilustración 6 permite apreciar a gran escala las estructuras existentes que moldean la morfología de la región; las fallas normales o cizallas de gran extensión son notables con una dirección preferente N-S, además de apreciarse una geología de contraste entre las formaciones sedimentarias sobreyaciendo o en contacto con los grandes bloques metamórficos que forman el basamento en gran parte del estado. Dentro de las cartas se hacen presentes tres complejos metamórficos que forman el basamento, recubiertos por rocas sedimentarias aflorando en distintos puntos del estado. El Complejo Oaxaca, el Complejo Acatlán y el Complejo Juárez, equivalen o son parte de los afloramientos del Terreno Zapoteco o Oaxaquia, del Terreno Mixteco y Terreno Cuicateco respectivamente (ver ilustración 8), esta nomenclatura varía según los autores. Algunos como Keppie (2004) han presentado resultados sobre la evolución y límites dentro del territorio mexicano para explicar su evolución e implicaciones paleotectónicas; y finalmente, como estos terrenos han moldeado el relieve que conocemos.



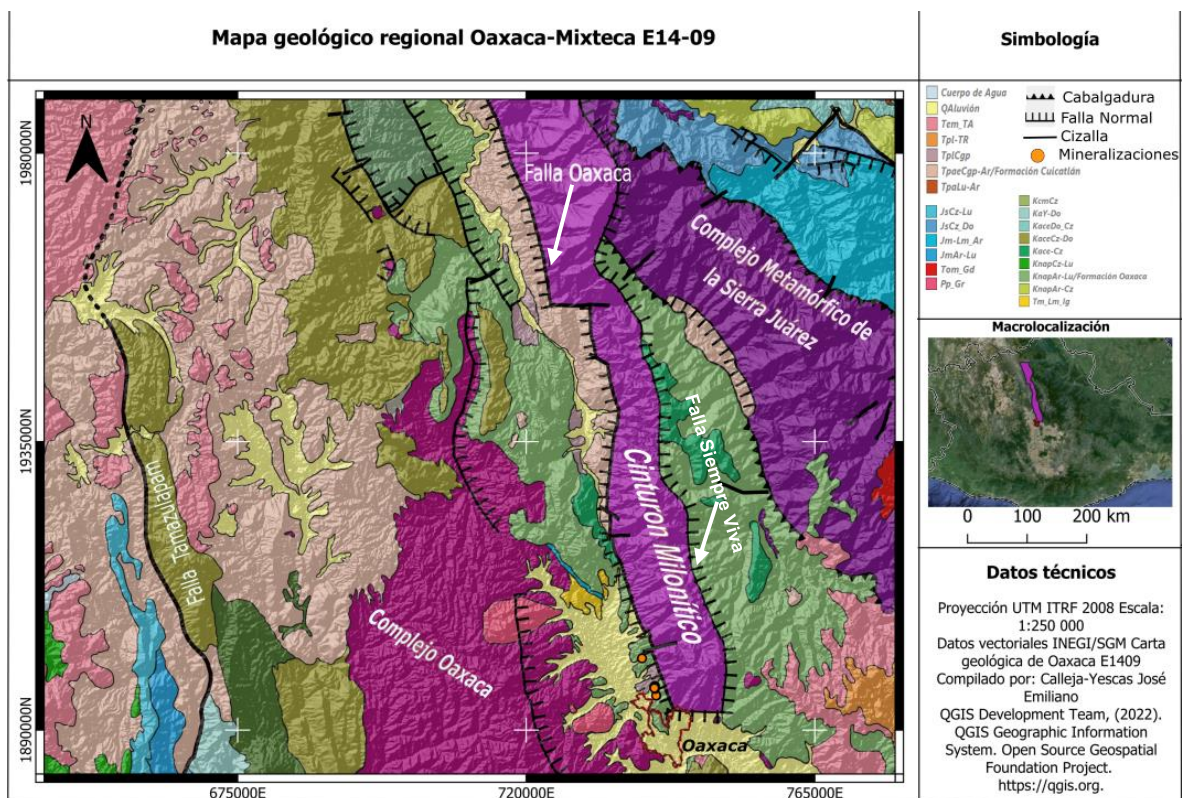


Ilustración 5. Macroreferenciación de los sitios mineralizados en la carta geológica regional E14-9.

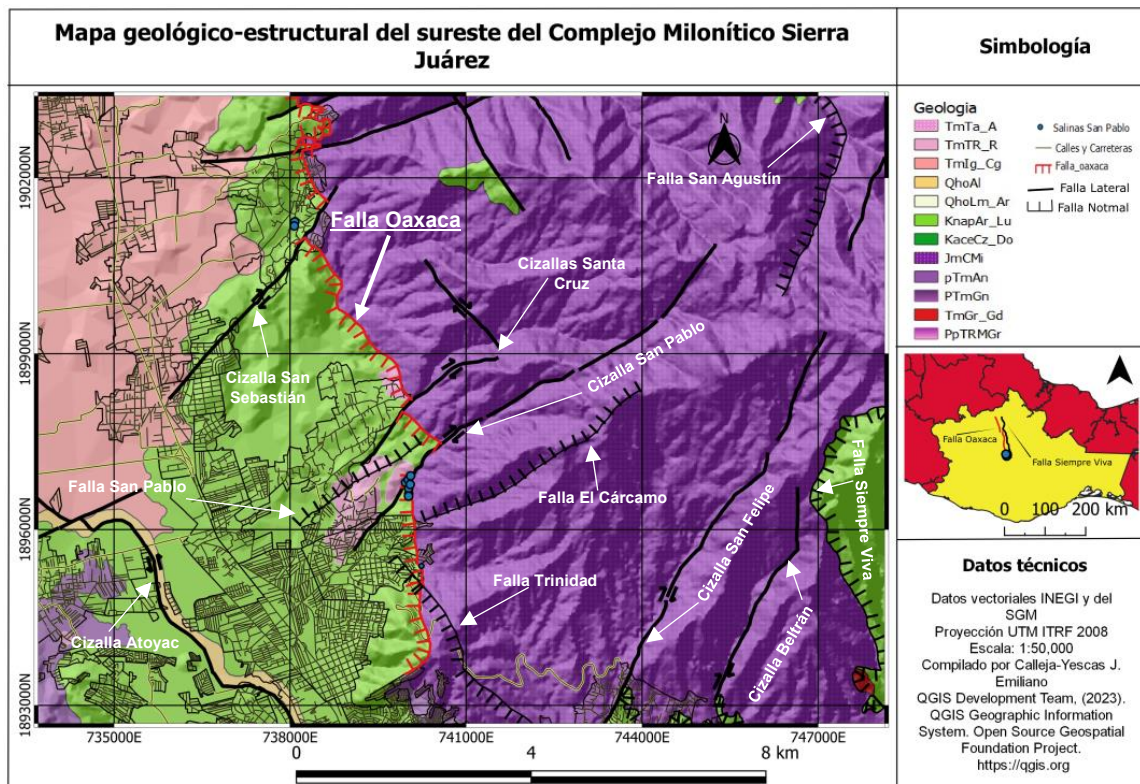


Ilustración 6. Mapa geológico local digitalizado de la carta geológica minera 1:50,000 E14-D47 del SGM.

### 2.3.2 Estratigrafía y Litología

Los resultados obtenidos por las campañas geofísicas ayudaron a definir una secuencia estratigráfica y litológica de los materiales del subsuelo en el Valle, en conjunto con lo descrito por el SGM (2009) en las secciones transversales y en los análisis realizados por Alaniz-Álvarez *et al* (1994) y Espejo-Bautista *et al* (2022).

El área de estudio presenta secuencias litoestratigráficas desde el Precámbrico hasta el Holoceno. Durante el magmatismo de la Sierra Madre del Sur en el Mioceno dos unidades volcánicas principales se identifican: andesitas y tobas andesíticas; y riolitas con tobas riolíticas. Además, existen cuerpos intrusivos granodioríticos del Oligoceno que atraviesan la mayoría de las unidades suprayacentes. La formación Suchilquitongo que se compone de ignimbritas y tobas en su mayoría está en el Valle entre Etla y Oaxaca de donde se obtienen las rocas color verde, características de la arquitectura del estado.

El Complejo Oaxaqueño o Terreno Zapoteco consta de paragneis, charnokita, mármol cipolino, diques pegmatíticos y anortosita. (pTmAn), siendo afectado por un metagranito de edad Permo-Triásico, llamado Granito de Etla. El Terreno Cuicateco lo forma el Cinturón Milonítico (JmCMi) del Jurásico Medio recubiertas por la Formación Oaxaca (KnapAr-Lu) que consta de areniscas, lutitas, conglomerado y calizas. Los depósitos cuaternarios corresponden a aluviones y limos-arenas. Algunas unidades de la cubierta terciaria son compartidas por los tres terrenos como son el conglomerado polimíctico y areniscas de edad Paleoceno-Eoceno y corresponde a la fase relacionada a la Orogenia Laramide, sobre la que descansa una unidad de tobas andesíticas y andesitas de edad Eoceno- Mioceno, este amplio rango es debido a que según dataciones se estima que pertenecen a un arco volcánico continental que ha migrado del noroeste al sureste. También se tiene una secuencia de calizas lacustres, limolitas que contiene el cuerpo de ignimbritas (Toba de Etla) de color verde de la Formación Suchilquitongo del Mioceno. En los Valles Centrales de Oaxaca la mayoría de las zonas urbanas yacen en suelo Cuaternario, rocas metamórficas y/o sedimentarias del Cretácico y Paleógeno, formando lomeríos con llanuras, valle de laderas tendidas con lomeríos y llanura aluvial con lomerío (ver ilustración 6). Se denomina así a la planicie que se extiende desde Telixtlahuaca hasta el sur de la Ciudad de Oaxaca con pendientes suaves y lomeríos con dirección N-S originada por la Falla Oaxaca, el basamento lo comprende el Complejo Oaxaqueño con cobertera Cenozoica.



### 2.3.3 Marco tectónico y geología estructural

Alaniz-Álvarez *et al* (1994) resaltan aspectos importantes de la geología estructural y el significado tectónico de este límite: (1) constituye el complejo Milonítico más grande de México y probablemente de la cordillera de Norte América. (2) el cinturón Milonítico es el límite entre dos terrenos de basamento distinto, que en partes tiene coberteras sedimentarias diferentes.

Las fases de deformación presentes en la zona de estudio corresponden a varios eventos tectónicos significativos en la región que son bastante antiguos. Las estructuras documentadas son del régimen dúctil y frágil. Las del régimen dúctil son foliación y milonitización en las rocas que conforman el Complejo Oaxaqueño, mientras que en la segunda se documentó principalmente en el Complejo Milonítico. Las estructuras del régimen frágil están representadas por fallas laterales y normales. Primero, un evento contemporáneo a la Orogenia Grenvilliana durante el Precámbrico dio origen a las rocas del Complejo Oaxaqueño, donde se encuentran las estructuras principales. La foliación gnéissica de estas rocas generalmente apunta hacia el norte y noroeste. Posteriormente, el bandeamiento original ha sido modificado por pliegues suaves que tienen ejes aproximadamente al noreste. Las rocas plegadas indican una etapa compresiva que posiblemente ocurrió al inicio del Cenozoico, asociada con el vulcanismo Oligo-Miocénico. Finalmente, durante el Plio-Cuaternario existe fracturamiento y fallamiento normal que afecta a todas las unidades rocosas de la zona. Observándose estructuras sobresalientes del régimen dúctil como foliación y milonitización desde topografías bajas hacia topografías altas expuestas en la Sierra. Entre los más sobresalientes está la *zona de sutura*, de más de 130 kilómetros de largo en afloramiento y entre 10 a 15 kilómetros de ancho con orientación norte-sur denominado Complejo Milonítico, que representa el límite entre los terrenos Oaxaca y Juárez, superficialmente en el mismo sentido y hacia el oriente como puede verse cartográficamente en los mapas geológicos; delimitado al oriente por la cizalla la Falla Siempre viva, al poniente por la Falla Oaxaca que es una falla normal originada por la reactivación Cenozoica de una antigua cabalgadura y al sur por la Falla de Donají de tipo normal. En la ilustración 6 se puede observar la Falla Tamazulápam que constituye el límite de los terrenos estratotectónicos Mixteco y Oaxaca, es una falla lateral derecha con rumbo NO 30° SE, flexionándose en su porción intermedia para luego tomar una orientación sensiblemente N-S. (SGM, 2008).

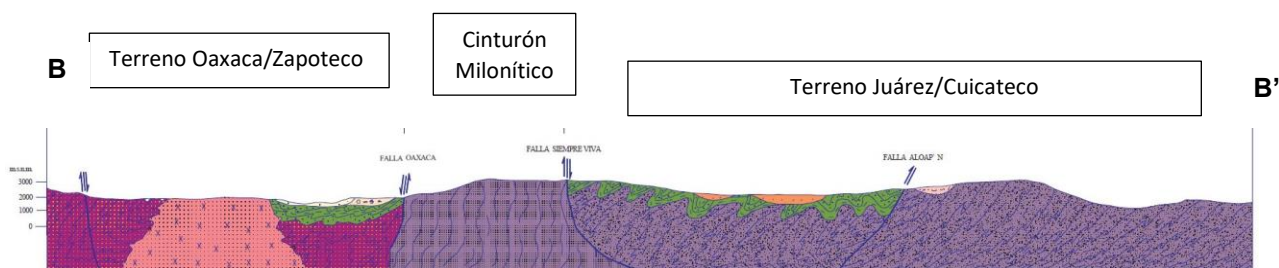
### 2.3.3.1 Contacto: Zapoteco-Cuicateco (Cinturón de milonitas)

El Cinturón Milonítico está compuesto de rocas de metamorfismo cataclástico de cizalla. Consta de protomilonitas, milonitas, ultramilonitas y cataclástitas (SGM, 2008); el mapa geológico estatal del SGM (2009) y la ilustración 6 facilita visualmente la distribución superficial de estos materiales. Estas rocas están compuestas al menos por 5 protolitos siendo estos: gneis cuarzo-feldespáticos, rocas graníticas, rocas básicas, ultrabásicas y esquistos. Ortega-Gutiérrez (1981a) lo describe como “un cuerpo plutónico cuarzo-feldespático milonitizado y recrystalizado; que se comprende de gneises, migmatitas y esquistos metasedimentarios, intrusionados por granitos deformados y no deformados que se correlaciona posiblemente al Complejo Xolapa”. Definido como una tectonita lineal que se extiende en dirección N-NO en la región central de Oaxaca, desde los límites con Puebla hasta Pochutla, con afloramientos continuo y cubiertos parcialmente por formaciones Cenozoicas llegando a tener de 50 hasta 120 km de ancho, con actividad prolongada estimada desde el Proterozoico y que ha variado su movimiento de acuerdo con el régimen tectónico sometido.

La interpretación evolutiva del Complejo de la Sierra Juárez desde hace 260 m.a. (millones de años) aproximadamente, cuando Pangea se encontraba ensamblado hasta inicios del Cretácico nos la proporcionan Espejo-Bautista *et al* (2023); sus resultados ilustraron modelos de evolución paleogeográfica que obtuvieron de la correlación en campo y las pruebas U-Pb de las unidades metamórficas, gracias a estos es más fácil concebir el comportamiento y las propiedades de ultrametamorfismo presente en el cinturón milonítico. La diversidad geológica y petrográfica por ende es muy extensa así lo definió por su parte Alaniz-Álvarez *et al* (1994) al señalar eventos de magmatismo, depósito de sedimentos y metamorfismo. Estos se diferencian en 4 grupos litológicos relacionados directamente a la naturaleza del protolito desde Cuicatlán hasta la ciudad de Oaxaca; similarmente sus resultados convergen en que la edad del cinturón metamórfico es del Pérmico tardío al Jurásico Superior, su exhumación comienza en el Jurásico y aflora en el Cretácico temprano, para ser levantado durante el Cenozoico Superior por un fallamiento normal.

La sección transversal B de la carta regional en la ilustración 7, muestra el arreglo estructural y el contacto tectónico entre los 3 terrenos en una escala amplia; donde emerge el Cinturón Milonítico. El fallamiento normal al Este y Oeste forman este valle o

graben donde se ubican los Valles Centrales. La cobertera Mesozoica y Cenozoica sedimentarias puede representarse en unos escasos 1000 metros en comparación con los bloques metamórficos. Se incluye también las secciones B y C de la Carta 1:50,000 en los anexos 3 y 4, donde puede interpretarse visualmente de una mejor manera el arreglo estructural del Valle y el contacto litoestratigráfico mediante fallamientos normales y de cizalla que tienen una dirección semiparalela como lo indica la cartografía y el mapeo geofísico interpretado por el Consejo de Recursos Minerales (2001).



*Ilustración 7. Sección transversa B. Modificado de la Carta Geológica-Minera Regional de Oaxaca del SGM 1:250000.*

### 2.3.3.2 Terrenos tecnoestratigráficos de México

El primer análisis comprensivo de los terrenos tectonoestratigráficos del sureste del país donde se describe la tectónica de México con una complejidad no compartida de las características y las implicaciones paleogeográficas de esta compleja unión siempre han sido un misterio e incluir la configuración en las relaciones entre el Océano Atlántico en el Mesozoico, el Golfo de México, los Apalaches Paleozoicos; y como se mezclan con las de la Cordillera de América del Norte; lo realizó Campa (1983). Posteriormente, el trabajo de Sedlock *et al* (1993) comprende una base de datos geológicos y geofísicos del territorio mexicano relativamente más extensa ofreciendo una interpretación de la historia geológica de estos terrenos morfotectónicos, su desplazamiento y las fallas que los delimitan.

Para comprender desde una perspectiva amplia y adecuada el posible origen de las aguas que emergen a través del contacto, en conjunto con una correlación más certera de las rocas que existen en el sitio de estudio, es necesario abordar algunas de sus características petrológicas en sus distintas unidades y sus implicaciones tectónicas.

Los estudios que se han llevado a cabo sobre los afloramientos metamórficos que rodean la Ciudad de Oaxaca respecto a la evolución, el arreglo geológico de estos terrenos y las estructuras que los moldean los han publicado Carfantan (1981), Keppie (2004), por mencionar algunos. Además, se cuenta con datos petrográficos, geoquímicos y radiométricos publicados por Ortega-Gutiérrez (1981b) que hacen una descripción de los cinturones metamórficos existentes al sureste de México; y recientemente se correlacionaron pruebas isotópicas con edades en el Paleozoico temprano en los trabajos de Espejo-Bautista *et al* (2022), Cano *et al* (2022) y Keppie (1995). La conjunción de todos estos resultados sugiere que gran parte del territorio mexicano está sustentado por un basamento Proterozoico y/o sedimentos derivados de dicho basamento, que podrían ser exóticos en comparación con las unidades tectónicas adyacentes en América del Norte y podrían haber tenido su origen en el noroeste de Sudamérica.

Los estudios en paleontológicos en geofísica y geología proponen que alrededor de un 80% de la Cordillera de Norteamérica que se encuentra en México, está formada de terrenos sospechosos, descritos así porque su entorno paleogeográfico con respecto al cratón norteamericano en varios momentos durante gran parte del tiempo Fanerozoico es incierto. Gran parte del noreste y sureste de México está sustentado por un basamento acumulado durante el Paleozoico tardío, una extensión de la orogenia de los Apalaches-Ouachita y ha sido considerablemente modificado durante el Jurásico por fallas relacionadas con la apertura del Golfo de México. Esta parte de México está compuesta en gran parte por varios terrenos de arco magmático submarino distintos del Jurásico tardío al Cretácico tardío con basamento desconocido que parecen haberse acumulado contra el margen alterado de América del Norte a principios del Terciario. De esta manera, reconstrucciones mesozoicas tempranas tiene profundas implicaciones para el estudio de la tectogénesis en la Cordillera sur, así como para la interpretación de los vastos recursos naturales de México. (Sedlock et al., 1993).

En palabras de Campa (1983): “los análisis preliminares indicaron que los depósitos de oro, plata y plomo-zinc de México están directa o indirectamente relacionados con las distribuciones de los terreno discutidos”.

Por definición todos los terrenos *estratotectónicos* o *tecnoestratigráficos* según los autores consultados; son fragmentos extensos de litosfera que están delimitados por

fallas importantes conocidas, que son discontinuidades en la estratigrafía que marcan cambios críticos en la edad y/o litología que no pueden explicarse debido a discordancias o cambios en las facies y se utilizan como herramientas cartográficas para separar conjuntos de rocas con tectónicas diferentes.

México se divide en 3 unidades mayores tecnoestratigráficas:

-Zona noroccidental: la continuación directa hacia México del sureste del basamento cratónico autóctono norteamericano y su cobertura Mesozoica.

-Zona oriental: se rodea por el Golfo de México y de edad principalmente Paleozoica que tiene relación con materiales acumulados durante la Orogenia Apalachiana.

-Zona occidental: a lo largo del extenso margen del Pacífico, se caracteriza por una variedad de rocas volcánicas y sedimentarias, mayormente de origen submarino del período Mesozoico tardío.



*Ilustración 8. Terrenos tectonoestratigráficos en México de acuerdo con (Ortega-Gutiérrez, 1981a). M: Terreno Mixteco. CU: Terreno Cuicateco. Z: Terreno Zapoteco. TMVB: Cinturón Volcánico Transmexicano. Modificado de (Sedlock et al., 1993).*

La síntesis a continuación se elaboró a partir de las descripciones del emplazamiento de los terrenos Cuicateco, Zapoteco y de manera breve el terreno Mixteco debido a que este último no tiene presencia en la zona de estudio. (Para detalles ver anexo 6).

El Terreno Mixteco en su fragmento más antiguo, las rocas representativas y más conocidas son del Complejo de Acatlán; el cual experimentó múltiples fases de metamorfismo y deformación donde se infiere que, en una zona de subducción del Paleozoico temprano, la placa superior sobrepasó a la placa inferior, lo cual causó un metamorfismo de alta presión y un plegamiento isoclinal en la placa superior en respuesta al acortamiento noroeste-sureste. Se compone de rocas metamórficas como filitas, cuarcitas, gneiss, esquistos, anfibolitas, metagabros; derivadas de rocas marinas intercaladas con rocas ígneas máficas.

### Terreno Zapoteco

El Terreno Oaxaca o Oaxaquia como también se conoce a este fragmento de litosfera que se estima se formó en el Precámbrico con rocas cristalinas de edad en el Proterozoico hace aproximadamente 900 millones de años. Los estudios geocronológicos permitieron situarlo teóricamente en la provincia de Grenville en el sureste canadiense, aunque existen otras interpretaciones sobre su origen y migración. Durante el Paleozoico, es probable que el Terreno Zapoteco fuera desplazado hacia el sur desde el margen sur de América del Norte, y hacia finales del Paleozoico pudo haber albergado un arco magmático dentro o al oeste del margen occidental de Pangea. Además, los resultados paleomagnéticos indican que sus desplazamientos respecto al cratón norteamericano se aplican al terreno Zapoteco y al Mixteco de la misma forma. Este terreno forma el basamento de un porcentaje importante del estado de Oaxaca, aflora en poblados cercanos como San Pedro Ixtlahuaca y la Ciénega, hacia el oeste de la ciudad de Oaxaca. El Terreno Zapoteco corresponde al Terreno de Oaxaca. (Campa & Coney, 1983). El Complejo Oaxaca es la unidad más antigua del terreno, son un conjunto de meta-anortosita, ortogneis cuarzofeldespático, paragneis, rocas metasedimentarias que se formaron mediante el metamorfismo Grenvilliano, las rocas Paleozoicas y Mesozoicas como las areniscas, rocas clásticas-sílicas y calizas son similares al terreno Mixteco sobreyaciéndolo. Muchas de estas rocas se remagnetizaron durante el Pérmico Tardío y Jurásico debido a intrusiones de edad Permo-Triásica. Los estratos neógenos no marinos y las rocas volcánicas se depositaron en grabens alargados que se formaron aproximadamente entre 19 y 12 millones de años a lo largo de la Falla de Oaxaca en el margen oriental del Terreno Zapoteco.(Centeno-García, 1988).

## Terreno Cuicateco

La teoría que propone el arreglo de estas unidades de rocas se describe en el trabajo publicado por Ángeles-Moreno (2012) que ubican estas rocas en el Cretácico Superior hace 82.5 m.a. y en el Paleógeno, donde experimentaron deformación y metamorfismo generalizado. Sin embargo, muchos aspectos de la geología del terreno Cuicateco aún no están resueltos. El Terreno Cuicateco se divide en tres unidades estructurales distintas. En términos generales, estas unidades rocosas se correlacionan con las del Terreno Juárez, aunque con diferencias en la ubicación de los límites del terreno y sobrepasan estructuralmente al Terreno Maya y subyacen bajo el Zapoteco.

La unidad estructuralmente más baja está compuesta por greenstone, lentes de gabro y serpentinita, metatoba y grauvaca en la parte sur del terreno. La unidad intermedia, que es la más extensa, consiste en un conjunto de flysch, toba, pizarra negra y roca caliza fuertemente deformados, pero débilmente metamorfoseados que contiene microfósiles y amonites del Cretácico Temprano. El conglomerado calcáreo contiene porcentajes de gneis y filita; esta unidad intermedia es localmente intruída por serpentinitas y cortada por filita-cuarcita de bajo grado y greenstone. Los protolitos de esta unidad se depositaron en una cuenca desde el Jurásico hasta el Cretácico temprano, conocida como cuenca Cuicateca. La unidad estructuralmente más alta del terreno incluye milonitas máficas y ortogneis silíceos que afloran en el límite occidental del Terreno Cuicateco, dentro de la sutura de Juárez. Los protolitos de estas rocas probablemente incluyen, aunque no exclusivamente, lavas masivas y almohadilladas de composición intermedia a silícica, que a veces contienen xenolitos gnéisicos derivados probablemente del Complejo Oaxaqueño del Terreno Zapoteco. Las rocas metavolcánicas se infiere que son congenéticas con los metagranitoides localmente miloníticos fuertemente deformados, de la unidad estructural más alta del Terreno Cuicateco. Mediante dataciones se define una posible intrusión durante el Jurásico Medio, seguido de metamorfismo y cataclasis durante el Cretácico Inferior. La sutura de Juárez incluye rocas miloníticas derivadas de anortosita del Terreno Zapoteco adyacente debido a la deformación por empuje, plegamiento y desarrollo la Orogenia Laramide. Sin embargo, no se conservan las relaciones estratigráficas primarias y no es posible reconstruirlo completamente. (Sedlock et al., 1993).

### 3. Capítulo 3. Marco Teórico.

#### Estado del arte.

##### Geofísica de la Falla Oaxaca.

La Falla Oaxaca ha tenido un aumento en la forma de su estudio desde un terremoto que ocurrió en los años 70's, pues se definió como zona de riesgo sísmico al estudiar las depresiones tectónicas importantes entre Oaxaca y Puebla (Vivo (1973) en (Centeno-García, 1988)). A partir de esto, la adquisición de datos geofísicos (electromagnéticos, sísmicos, gravitacionales) para comprender los mecanismos tectónicos relacionados a la Falla Oaxaca o *zona de sutura*; han sido principalmente a escala regional como los realizados por el SGM (2001), demostrando la presencia de lineamientos magnéticos regionales.

Según los modelos del límite entre los terrenos Oaxaca-Juárez, este se encuentra al este de la cuenca de Zaachila aunque la cobertura de gravedad es demasiado escasa para establecer la estructura de la subcuenca de Mitla, los afloramientos cercanos del basamento oaxaqueño sugieren una falla que se inclina hacia el oeste a lo largo de su margen oriental (Belmonte-Jiménez, 2005). Las interpretaciones de perfiles gravitacionales indicaban diferencias en las densidades de los materiales entre los 2 terrenos. Belmonte-Jiménez (2010) publicó resultados de estudios potenciales en un megaproyecto en el Valle de Oaxaca que otorgan un escenario del arreglo estructural donde se describen las características geológicas del subsuelo, incluyendo la distribución y naturaleza de los terrenos presentes.

Los resultados de las prospecciones magnetoteléuricas de Campos-Enríquez *et al* (2013) demuestran valores de resistividades eléctricas similares entre el Terreno Oaxaca y el Complejo Milonítico, pero logrando diferenciar sus unidades rocosas en distintas mineralogías, esta información ayudó a establecer una explicación para su desaparición en las Fallas Donají y Siempre Viva. Se define además la dirección del rumbo geoeléctrico obtenida de los datos del MT consistentes con el rumbo mapeado de la falla de Oaxaca, así como con el límite entre los terrenos de Oaxaca y Juárez. La existencia de una zona E-O de debilidad de la corteza entre los perfiles podría dar como resultado dos dominios reológicos separados en la corteza. La compensación isostática y el empuje hacia el oeste del terreno Juárez podrían haber formado el Complejo Milonítico. La isostasia



habría contribuido a la exhumación de este rasgo. Se describen de igual forma las profundidades del basamento en los perfiles y espesores de las unidades litológicas, en las que destacan que la Falla Oaxaca no penetra mucho en la corteza y que el complejo milonítico está limitado hasta unos 10 km de profundidad. Concretamente Campos-Enríquez *et al* (2010) que “los contactos del Terreno Oaxaca con rocas mesozoicas parecen coincidir con las fallas inferidas y cartografiadas; sin embargo, la presencia de la plataforma Cretácica a través de los terrenos de Oaxaca, Juárez y Maya sugiere que los límites de las fallas actuales son posteriores al Mesozoico. La distribución de las rocas del Jurásico puede haber estado controlada por los movimientos dextrales sincrónicos en la zona miloníticas de Juárez que separa los terrenos de Oaxaca y Juárez”.

Por su parte, Espejo Bautista *et al* (2020) y Keppie *et al* (2011), interpretan datos geocronológicos de campo sugiriendo modelos tectónicos-evolutivos de los fragmentos litosféricos pre-Paleozoicos que se emplazaron al sureste del territorio mexicano, donde el basamento proterozoico se vio afectado por una apertura de cuenca, desencadenando procesos orogénicos caracterizados por magmatismo y metamorfismo. Esta secuencia de eventos tectónicos podría correlacionarse con la evolución tectónica en Centroamérica y Norteamérica, así como con las formaciones Proterozoicas y Paleozoicas de la cordillera central de los Andes en el noroeste de Sudamérica.

Las prospecciones geofísicas aéreas de Arzate-Flores *et al* (2016) y (2007) definen la Falla Oaxaca como un sistema compuesto por fallas que se orientan de norte a sur y de noroeste a sureste. En su parte sur, se describe como el límite entre las áreas de Cuicateco y Zapoteco y se extiende desde el municipio Miahuatlán al sur de la Ciudad de Oaxaca hasta Tehuacán, Puebla; a lo largo de aproximadamente 200 kilómetros. Actúa como el borde occidental de las sierras Mazateca y Juárez, asociándose a una zona de cizalla antigua, que ha sido reactivada recientemente. A simple vista, la traza de la falla desaparece al sur de la ciudad de Oaxaca y no hay evidencias claras de su presencia en el subsuelo en esa dirección, pero es lo que se propone con los datos magnetotélúricos modelados.

De igual forma, las características geométricas, direcciones y magnitudes de esfuerzos durante su actividad más reciente son importantes en la comprensión del arreglo local y

esto es posible con ayuda de los resultados obtenidos por Alaníz-Álvarez *et al* (1997) y Nieto-Samaniego *et al* (1995).

Dentro de la información aeromagnética recopilada por el Consejo de Recursos Minerales (2001), actualmente el Servicio Geológico Mexicano; se destaca que los intrusivos ascendieron durante el magmatismo de arco se denominaron fenómenos ortomagmáticos hidrotermales y/o meta somáticos. Así como la identificación de fallas profundas y estructuras favorables para depósitos minerales. La interpretación cualitativa de la carta Oaxaca E14-9 identifica los rasgos magnéticos principales. Los rasgos de interés para este trabajo fueron 7 grupos de dominios y lineamientos magnéticos al norte de la Cd de Oaxaca. Los primeros son formados por anomalías de alto gradiente entre - 270 nT a 380 nT, éstos se relacionan a intrusivos a profundidad que se emplazan en zonas débiles y falladas del Complejo Milonítico y Juárez, o bien se trate de rocas ultrabásicas del basamento magnético que pertenece al protolito del Complejo Milonítico. Cabe señalar que a pesar de que las unidades con que se correlacionan estos dominios magnéticos son muy diferentes desde el punto de vista geológico, la respuesta magnética que presentan es muy similar (debido a que la susceptibilidad magnética de dichas unidades es muy pequeña), motivo por el cual, al nivel de la presente interpretación regional, se agruparon en un solo dominio magnético. Respecto a los lineamientos, se identifican sistemas con rumbos NW-SE con variaciones N-S, estos se interrumpen en lo que se interpretan como contactos de unidades, zonas débiles donde pueden emplazarse intrusivos a profundidad, los cuales no generan manifestación superficial evidente. Algunos grupos de lineamientos se correlacionan a las fallas que rodean el Complejo Milonítico. La interpretación de los mapas con filtros pasa-bandas como la reducción al polo y primera derivada vertical; se asocia a estructuras, superficiales y profundas, agrupando unidades geológicas. Por último, la existencia de un interés geológico minero desde Valle de Oaxaca hasta poblados como Concepción Pápalo en la Cañada es relevante, estos se encuentran sobre el cinturón de Milonitas en dirección a Tehuacán. Datos sobre geocronología mediante fechamientos geoquímicos y termobarométricas arrojan pruebas sobre la subducción y su relación con los cuerpos plutónicos de Etlá, y eventos de deformación Laramídica como se discute Ortega-Obregón *et al* (2003) y Florez-Amaya *et al* (2023). Siendo de importancia la actividad del Plutón de Etlá y su emplazamiento para los efectos estudiados en el presente.

### 3.1 Ciclo de las rocas.

El ciclo de las rocas describe el proceso de regeneración, desplazamiento y cambio a lo largo del tiempo geológico de la corteza terrestre. Este se explica brevemente en 4 puntos importantes:

1. Meteorización y erosión: Las rocas expuestas a la superficie de la Tierra se ven afectadas por factores atmosféricos como el agua y el viento, fragmentándose en pequeñas partículas.
2. Transporte y deposición: El material erosionado es transportado por ríos, viento o glaciares donde los sedimentos se comprimen mediante alta presión y se cementan con minerales disueltos en el suelo para formar rocas sedimentarias.
3. Subducción y metamorfismo: Las rocas ígneas, sedimentarias e incluso otras rocas metamórficas pueden verse afectadas por las altas presiones y temperatura debajo de la superficie terrestre al enterrarse más profundo.
4. Derretimiento y reciclaje: A medida que las placas tectónicas se mueven, algunas rocas pueden ser arrastradas hacia el manto terrestre, donde se funden debido al gradiente geotérmico, convirtiéndose eventualmente en nuevo magma que eventualmente al ascender se cristaliza formando rocas ígneas.

Este ciclo continúa durante millones de años bajo la influencia de procesos geológicos y aunque las rocas puedan parecer estables y constantes, el ciclo de las rocas muestra que esto no es cierto. Sin embargo, estos cambios no ocurren rápidamente; en realidad, necesitan períodos extensos de tiempo. Esta formación y destrucción de las rocas que han moldeado la superficie se relaciona con la teoría de tectónica de placas, que ha contribuido a la comprensión de los procesos que evoluciona nuestro planeta, el conocimiento sobre el metamorfismo refuerza esta dinámica. Este modelo sitúa el metamorfismo en las zonas de placas de bordes convergentes, donde estas colisionan y las fuerzas de compresión deforman los sedimentos que se han acumulado en los márgenes continentales formando eventualmente montañas.

Muchos de los principales cinturones montañosos de la Tierra, como los Alpes, el Himalaya y los Apalaches, se formaron por la colisión de placas tectónicas. Estos

sistemas montañosos están mayormente compuestos de rocas sedimentarias deformadas y metamórficas, que resultaron de la presión entre placas convergentes.

También se produce metamorfismo en zonas de subducción donde la corteza desciende hacia el manto y se genera magma a partir de las rocas que se van fundiendo por el calor, presión, volátiles presentes en los sedimentos y agua. Estas rocas fundidas ascienden a la superficie calentando y deformando el material alrededor, generando metamorfismo de contacto comúnmente; las sierras del sur de México en donde hay numerosas intrusiones ígneas y metamórficas son un ejemplo de este ambiente. Por tanto, los terrenos montañosos que se forman a lo largo de las zonas de subducción están constituidos generalmente por cinturones lineales bien definidos de rocas metamórficas. Cerca de la fosa oceánica, encontramos un régimen metamórfico de alta presión y baja temperatura similar al de la cordillera de la costa de California. (Ortega-Gutiérrez, 1981b)

### **3.2 Propiedades físicas de las rocas metamórficas.**

Las rocas metamórficas afloran en cinturones montañosos en diferentes partes del mundo como Brasil, México, Antártida, India, Rusia, Canadá, Sudáfrica, que en su mayoría forma los basamentos de los continentes o bien llamados kratones; de hecho, partes significativas de la corteza continental terrestre están compuestas por rocas metamórficas. Este tipo de rocas que tienen propiedades para identificarlas y clasificarlas como se aborda en los siguientes apartados, a diferencia de ciertos procesos ígneos y sedimentarios que suceden en ambientes cercanos o en la superficie, el metamorfismo generalmente ocurre en regiones profundas dentro de la Tierra, lejos de nuestra capacidad de observación directa.

Los eventos geológicos a gran escala de nuestro planeta como la formación de montañas, el movimiento de las placas, destrucción y creación de océanos; dinámicas que predominaron durante millones de años, tienen como consecuencia la generación y transporte de calor a través de las rocas, esto genera variaciones en las variables fisicoquímicas del metamorfismo como la temperatura y la presión (esfuerzo), por lo cual el metamorfismo o procesos metamórficos son los eventos que ocurren a altas temperaturas y transforman la composición química de las rocas que interactúan.

Entonces podemos decir que una roca metamórfica es aquella que ha desarrollado sus características mineralógicas y estructurales por procesos metamórficos o transformación de estas mismas. (Bucher & Frey, 2002).

En México las rocas metamórficas afloran en distintas partes del territorio como se menciona en el apartado 2.3.3.2 en conjuntos muy extensos de rocas con paleo-características similares que se denominan Complejos Metamórficos que guardan relación con los bloques antiguos del Proterozoico que comenzaban a formar la corteza de nuestro planeta.

### Condiciones y tipos de metamorfismo

El metamorfismo puede abordarse como metamorfismo de baja temperatura y de alta temperatura, pero el límite entre estos es la diagénesis en términos generales. Las variables que intervienen directamente son la presión, la composición de la roca y el agua presentes las que determinan la temperatura de recrystalización, de esta manera la fundición parcial de los silicatos que componen las rocas ocurre; de esta manera se define el límite del metamorfismo de alto grado, respectivamente puesto que en nuestro planeta se generan ambientes metamórficos más extremos donde las temperaturas se aproximan a las de fusión de las rocas. Sin embargo, durante el metamorfismo la roca debe conservarse en un estado sólido, de producirse la fusión completa entraríamos en el ámbito de la petrología ígnea. (Bucher & Frey, 2002).

Ocurre principalmente en tres ambientes distintos:

- El metamorfismo de contacto o térmico se da cuando una masa magmática penetra en las rocas circundantes, aumentando su temperatura interna y provocando cambios.
- El metamorfismo hidrotermal implica alteraciones químicas causadas por la circulación de agua caliente rica en iones a través de las fracturas de las rocas, típicamente asociado con actividad ígnea que facilita el calor necesario para estas reacciones.
- El metamorfismo regional, que genera la mayor cantidad de rocas metamórficas, ocurre en los límites convergentes donde las placas litosféricas chocan. En estas extensas áreas de la corteza terrestre se experimentan plegamientos, fallas y metamorfismo significativo. Este proceso se ve potenciado por el enterramiento profundo y la intrusión de magmas

del manto, que generan altas temperaturas y provocan las zonas más intensas de metamorfismo. Las rocas afectadas por el metamorfismo regional frecuentemente muestran áreas de metamorfismo de contacto y metamorfismo hidrotermal.

| <b>Grado local</b>        | <b>Grado regional</b>               |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Metamorfismo de contacto  | Metamorfismo orogénico              |
| Metamorfismo cataclástico | >>Metamorfismo de subducción        |
| Metamorfismo por impacto  | >>Metamorfismo de colisión          |
| Metamorfismo hidrotermal  | Metamorfismo de la corteza oceánica |
|                           | Metamorfismo por enterramiento      |

*Tabla 1. Tipos de metamorfismo*

La composición mineral de la roca original es fundamental en la determinación del grado de cambios inducidos por cada agente metamórfico: el calor es crucial ya que proporciona la energía necesaria para desencadenar reacciones químicas que conducen a la recrystalización de los minerales; la presión, al igual que la temperatura, aumenta con la profundidad y bajo presiones de confinamiento, los minerales tienden a recrystalizarse en formas más compactas; durante la orogenia, las rocas experimentan esfuerzos diferenciales que las comprimen en la dirección de la presión aplicada y las elongan en direcciones perpendiculares a esa fuerza. En las profundidades, las rocas se vuelven calientes y dúctiles, permitiéndoles deformarse y fluir bajo esfuerzos diferenciales. Los fluidos químicamente activos, típicamente agua o dióxido de carbono que contiene iones disueltos, también desempeñan un papel crucial al intensificar el proceso metamórfico mediante la disolución de minerales y contribuyendo a la migración de componentes. Lo anterior, puede comentarse de acuerdo con evidencias reportadas en trabajos como los de Deng *et al* (2018) en zonas convergentes de alto metamorfismo.

## Conceptos de clasificación de las rocas y minerales metafórmicos

Las rocas metamórficas se forman a partir de rocas preexistentes, ya sean ígneas, sedimentarias o metamórficas que se conocen como protolitos, influyen significativamente en la composición química y mineralógica de las rocas metamórficas resultantes, así durante el metamorfismo las rocas experimentan reacciones químicas que sustituyen los conjuntos minerales originales por otros nuevos.

No hay un único principio de clasificación para las rocas metamórficas, lo que permite una variedad de nombres aceptados que son generalmente simples o auto explicativos con términos técnicos y expresiones menos comunes, pudiendo sonar complicados, por esto es fundamental definir y revisar los nombres y clasificaciones utilizadas actualmente al trabajar con estas rocas. Los nombres de las rocas metamórficas constan de una raíz y prefijos opcionales. La raíz puede ser un nombre especial (como anfibolita) o describir la estructura de la roca (como gneis), basada en los minerales metamórficos dominantes (anfibolita: contiene anfíbol + plagioclasa; gneis: contiene feldespato  $\pm$  cuarzo). Los prefijos pueden agregar detalles estructurales o información mineralógica adicional (por ejemplo, granate-anfibolita con epidota bandeadas, gneis hornblenda). (Tarbuck & Lutgens, 2004).

### Nombres de las rocas metamórficas

La caracterización de las rocas metamórficas implica describir detalladamente su estructura en los términos que se describen a continuación:

-Estructura: La disposición de las partes de un macizo rocoso, independientemente de la escala, incluye las interrelaciones geométricas entre las partes, así como las formas y características internas de las piezas. Los prefijos micro-, meso- y mega- se utilizan para describir la escala de las características. Micro- se refiere a la escala de la sección delgada, meso- al espécimen manual y a la escala de afloramiento, y mega- a escalas mayores.

-Foliación: Cualquier característica estructural plana o que ocurre repetidamente en un cuerpo rocoso.

-Esquistosidad: Es un tipo de foliación que surge por deformación y/o recristalización, resultando en una orientación preferida de granos minerales desiguales.

-Estructura de gneiss: Es una foliación a escala mesoscópica, producida por deformación y recristalización, caracterizada por estratificaciones irregulares o mal definidas, agregados lenticulares de granos minerales, y granos minerales desiguales que, al mostrar una orientación preferida débil, define una esquistosidad poco desarrollada.

-Cataclasis: Es la deformación de la roca causada por combinaciones de fracturación, rotación y deslizamiento por fricción, lo cual resulta en la generación de granos minerales y/o fragmentos de roca de diversos tamaños, generalmente angulares.

-Esquisto: se refiere a una roca metamórfica que muestra una esquistosidad bien desarrollada, definida por la orientación preferida de abundantes granos minerales desiguales en la escala del espécimen manual. Este término se reserva típicamente para variedades de grano medio a grueso en rocas ricas en filosilicatos.

-Pizarra: se refiere a una roca de grano muy fino y de bajo grado metamórfico que muestra una segmentación pizarrosa.

-Filita: es una roca de grano fino de bajo grado metamórfico que exhibe una esquistosidad penetrante perfecta debido a la disposición paralela de filosilicatos, con superficies de foliación que a menudo presentan un brillo lustroso.

El metamorfismo puede asociarse localmente a un grado extremadamente alto de deformación de las rocas. A continuación, se definen algunos nombres especiales muy utilizados para las rocas de media-alta deformación:

Deng *et al* (2018) publicaron características de estas rocas y su función como indicadores de eventos geológicos.

- Milonita. Roca producida por reducción mecánica del tamaño de grano como resultado de deformación dúctil, no cataclástica, en zonas localizadas (zonas de cizalla, zonas de falla), que da lugar al desarrollo de una foliación penetrativa a escala fina, y a menudo con una lineación mineral y de estiramiento asociada.

-Migmatita. Roca compuesta de silicato, mayormente heterogénea a escala meso a megascópica, que se encuentra en terrenos metamórficos de grado medio a alto (rocas



características de la corteza continental media e inferior). Las migmatitas se componen de partes oscuras (máficas) y partes claras (félsicas) en asociación estructural compleja.

-Cataclasita. Roca que ha sufrido cataclasis.

-Brecha de falla. Cataclasita con estructura de brecha formada en una zona de falla.

-Meta-. Si puede identificarse un origen sedimentario o ígneo de una roca metamórfica, puede utilizarse el término original de roca ígnea o sedimentaria precedido de "meta" (por ejemplo, metagabro, metapelita, metasedimento).

-Ortho- y Para-. Prefijo que indica, cuando se antepone al nombre de una roca metamórfica, que la roca deriva de una roca ígnea o sedimentaria, respectivamente (p. ej., paragneis).

-Greenschist y greenstone. Rocas metamórficas esquistosas (greenschist) o no esquistosas (greenstone) cuyo color verde se debe a la presencia de minerales como la clorita, la actinolita, la epidota y la pumpellyita.

### **3.3 Conceptos básicos del electromagnetismo.**

A finales del siglo XVIII muchas características de la electricidad y el magnetismo terrestre eran conocidos. Las propiedades cualitativas de los imanes (por ejemplo, la concentración de sus potencias en sus polos) se habían establecido, pero las observaciones acumuladas no pudieron proporcionar una explicación más fundamental para la comprensión de los fenómenos por no ser cuantitativos. Se logró un avance importante mediante el francés Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), que en 1784 inventó un sistema que le permitió realizar mediciones cuantitativas de las propiedades del fenómeno electromagnético. En 1785 él publicó los resultados de sus intensivos estudios y estableció la ley del cuadrado inverso de la atracción y repulsión entre pequeñas esferas cargadas eléctricamente; finalmente usando agujas delgadas magnetizadas estableció que la atracción o repulsión entre sus polos variaban como el cuadrado inverso de su separación. La relación entre la corriente eléctrica y el magnetismo fue detectada en 1820 por Hans Christian Oersted (1777-1851), un físico danés; que en sus experimentos observó que una corriente eléctrica genera una fuerza

magnética, resultados que posteriormente pasaron por físicos como Felix Savart (1791–1841) y André Marie Ampere (1775–1836). Para este escenario en 1831 Michael Faraday (1791–1867) demostró lo que llamó inducción magneto-eléctrica. Sin verse obstaculizado por ecuaciones matemáticas, Faraday hizo contribuciones fundamentales para la comprensión de los procesos magnéticos, él utilizó el concepto de campo magnético por primera vez en 1845 partiendo de las interpretaciones del comportamiento del campo eléctrico. La regla que rige la dirección de la corriente inducida se formuló tres años más tarde, por el físico ruso Heinrich Lenz (1804-1865). Por otro lado, Carl Friedrich Gauss (1777–1855) un matemático alemán hizo aportaciones significativas, entre ellas fundó un observatorio geomagnético donde determinó la intensidad de campo magnético de la tierra, para analizar el conjunto de datos Gauss aplicó las técnicas matemáticas de análisis armónicos esféricos y la separación de variables, finalmente en 1839 estableció que la mayor parte del campo magnético de la Tierra era un dipolo; campo que se originó dentro de la Tierra. No fue hasta 1872 que los fundamentos físicos de las leyes que gobiernan los efectos magnéticos fueron establecidos por James Maxwell, un físico escocés, que derivó en un grupo de famosas ecuaciones todo el conocimiento de las relaciones entre las fuerzas eléctricas y magnéticas; la Ley de Ohm sobre la fuerza electromotriz, la Ley de Coulomb sobre las cargas y los polos magnéticos, la Ley de Ampere sobre el magnetismo y las corrientes eléctricas, la Ley de Faraday sobre la inducción electromagnética. (Lowrie, 2007).

## Principios eléctricos

Coulomb reestableció a partir de la ley de gravitación de Newton, que la fuerza de atracción o repulsión de dos esferas cargadas eléctricamente es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa el centro de las esferas, se define como:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \dots (1)$$

**Ley de Coulomb para la fuerza eléctrica (1)**

$\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica del vacío.

La teoría eléctrica moderna surge a partir del descubrimiento del electrón, el cual posee una carga negativa de  $1.602 \times 10^{-19}$  C. Los electrones libres en movimiento hacia una dirección común como suele pasar con los metales conductores se les denominan corrientes eléctricas

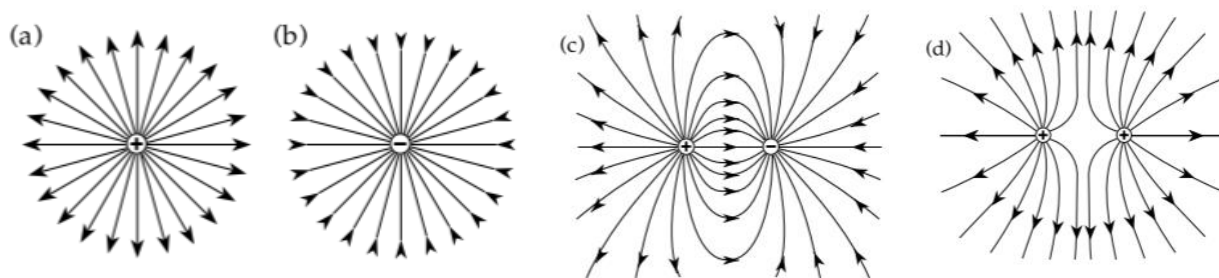
### Campo y potencial eléctrico

Michael Faraday introdujo el concepto de campo, para hacer referencia a la geometría de las líneas de fuerza que ejerce una carga  $Q$  en una carga de prueba con unidades en  $C \cdot N^{-1}$ . La fuerza del campo es representada por la concentración espacial de líneas de campo. Se expresa de la siguiente forma:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \dots (2)$$

**Ecuación para el campo eléctrico (2)**

La expresión (2) establece que la fuerza de campo aumenta entre más cercana la carga y se debilita conforme se aleja la carga. Consecuentemente, se requiere energía para mover partículas cargadas a cualquier otro punto sobre el campo; contribuyendo a la energía potencial del sistema. A esto se le denomina potencial eléctrico  $V$ .



*Ilustración 9. Sección plana de las líneas de campo eléctrico que salen de un punto cargado: (a) carga unitaria positiva, (b) carga unitaria negativa, (c) dos cargas iguales positivas y (d) dos cargas positivas iguales. Sección plana de las líneas de campo eléctrico que salen de un punto cargado: (a) carga unitaria positiva, (b) carga unitaria negativa, (c) dos cargas iguales positivas y (d) dos cargas positivas iguales. Modificado de (Lowrie, 2007).*

$$U = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \dots (3)$$

#### Expresión para el potencial eléctrico (3)

La energía requerida para mover una carga unitaria a otro punto del campo **E** generado por **Q** es la diferencia de potencial entre los puntos. La unidad en la que se expresa son los voltios.

#### Ley de Ohm

En 1827 el científico alemán Georg Simon Ohm establece que la corriente eléctrica **I** en un conductor es proporcional a la diferencia **V** de potencial a través de él. Es una expresión lineal que se expresa:

$$V = IR \dots (4)$$

#### Ley de Ohm (4)

Donde R, es la resistencia eléctrica del conductor expresada en ohms ( $\Omega$ ).

Las interacciones de los campos eléctrico y magnético se expresan con las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial a continuación.

La ecuación de Gauss para el campo magnético en su forma diferencial es una magnitud vectorial que se expresa matemáticamente como:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \dots (5)$$

#### Ley de Gauss para el magnetismo (5)

Esta ecuación establece que el flujo del campo magnético **B** a través de una superficie cerrada es nulo. Esto implica que no existen monopolos magnéticos, es decir, los campos magnéticos siempre forman "líneas cerradas" que no tienen principio ni fin.

Para el caso del campo eléctrico, la forma diferencial de la ecuación de Gauss establece que las cargas generan un campo eléctrico. Este campo  $\mathbf{E}$  es proporcional a la densidad eléctrica  $\rho$  entre la permitividad eléctrica del vacío  $\epsilon_0$ .

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \dots (6)$$

**Ley de Gauss para el campo eléctrico (6)**

Continuando, la ecuación Ampere-Maxwell describe cómo los campos magnéticos se generan tanto por corrientes eléctricas  $\mathbf{J}$  (densidad de corriente eléctrica) como por campos eléctricos variables en el tiempo  $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$  (término de desplazamiento eléctrico). El término  $\mu$  es la permeabilidad del vacío, y  $\epsilon$  es la permitividad del vacío.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \dots (7)$$

**Ley de Ampère-Maxwell (7)**

La ecuación de Faraday describe la generación de campos eléctricos a partir de campos magnéticos variables es importante porque implica que un campo magnético variable genera un campo eléctrico. Es la base del fenómeno de la inducción electromagnética.

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \dots (8)$$

**Ley de Faraday (8)**

Estas ecuaciones son fundamentales en electromagnetismo, ya que conectan el campo magnético con las fuentes de corrientes eléctricas y las variaciones en el tiempo de los campos eléctricos.

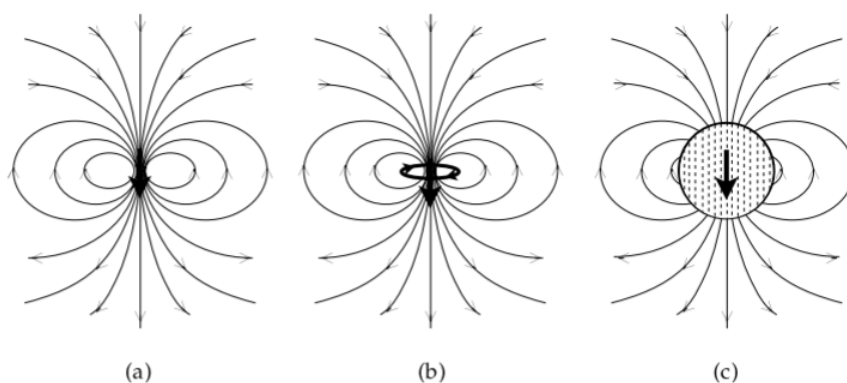
Indispensables para el desarrollo de las metodologías geofísicas modernas que dependen de variables como la resistividad eléctrica y la intensidad de campo magnético.

Los campos magnéticos y gravitacionales, aunque son regidos por las mismas ecuaciones potenciales, se establece la teoría de que el campo magnético se origina en corrientes eléctricas, incluidos los imanes permanentes, como señaló Ampère en 1820.

El campo magnético fundamental asociado con estas corrientes es se expresa como el vector **B**. El campo **B** también se llama inducción magnética o densidad de flujo magnético. Gauss demostró que no pueden existir polos magnéticos libres; cada polo positivo debe tener un polo negativo correspondiente. El campo dominante en el campo geomagnético y otros existentes es el de un dipolo magnético como se aprecia en la ilustración 10, con dos polos magnéticos de sentido opuesto infinitamente cerca uno del otro.

Inicialmente cuando los cuerpos magnéticos son expuestos a campos magnéticos experimentan una fuerza, o ya sea que exista un flujo magnético en ellos, sus polos se alinearan opuestamente.

Los conceptos de densidad de flujo magnético, fuerza del campo y permeabilidad magnéticos son esenciales para describir cómo los campos magnéticos interactúan con los materiales, como se abordará más adelante.



*Ilustración 10. Características de las líneas de un dipolo magnético alrededor de: a) una barra magnética pequeña, b) un tubo pequeño que lleva una corriente eléctrica y c) una esfera uniformemente magnetizada. Modificado de (Lowrie, 2007).*

## Dipolo magnético

Como ya se ha descrito la naturaleza dipolar de los polos magnéticos, la atracción entre dos pequeños segmentos con corriente eléctrica o una barra magnética como en la ilustración 10; se parte analogía a la expresión (1) para la fuerza eléctrica. La similitud con la expresión para la atracción gravitacional se debe a que el ambos son campos potenciales que se pueden abordar desde la teoría del potencial.

El momento magnético dipolar de dos polos de fuerza polar “ $m$ ” y separados por una distancia “ $r$ ” tendrán momento dipolar magnético:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} \dots (9)$$

Ecuación del momento magnético dipolar (9)

$\mathbf{r}$  es el vector unitario entre los dos polos, su dirección está a lo largo de la línea que conecta los polos del dipolo y se orienta a lo largo de dicha línea.

La fuerza también se obtiene como el potencial del momento dipolar y la interacción energía campo decae como  $\frac{1}{r^3}$ . Y se define como una magnitud vectorial que describe la fuerza entre polos magnéticos que se encuentran muy próximos y con diferente signo, expresados como  $\mathbf{m}_1$  y  $\mathbf{m}_2$ .

$$\mathbf{F} = K \frac{1}{r^3} [\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2 - 3(\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{r})(\mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{r})] \dots (10)$$

Fuerza magnética de dos polos (10)

Donde la  $K$  representa una constante definida por  $\frac{\mu_0}{4\pi}$ .  $\mu_0$  que es la permeabilidad magnética en el vacío.

A partir de la interacción de dos dipolos magnéticos. Se define la inducción magnética dipolar o el campo que genera un dipolo magnético.

El campo magnético que se crea por un dipolo  $\mathbf{m}$  en el espacio (fuera del dipolo) también decae como:

$$\mathbf{B} = K \frac{\mathbf{m}}{r^3} [3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} - \mathbf{m}] \dots (11)$$

**Campo de un dipolo generado por una barra magnética (11)**

Con  $r \neq 0$ .

En la ecuación (11) se expresa que el flujo de campo magnético es proporcional a la magnitud del vector de momento dipolar e inversamente proporcional al cubo de la distancia del dipolo.

Esto es directamente análogo al campo eléctrico de un dipolo eléctrico, y muestra claramente la dependencia de  $\frac{1}{r^3}$ .

Es importante destacar que el campo magnético puede expresarse en términos del vector  $\mathbf{B}$  (densidad de flujo magnético) que hace referencia a la cantidad de líneas de flujo magnético por una superficie, y de la intensidad de campo  $\mathbf{H}$  provocada por corrientes eléctricas. La relación entre  $\mathbf{B}$  y  $\mathbf{H}$  se define suele expresarse como:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \dots (12)$$

**Ecuación constitutiva en el electromagnetismo (12)**

Donde la constante de permeabilidad magnética absoluta ( $\mu$ ) es una propiedad física de los materiales que indica la capacidad de un material para permitir el paso de un campo magnético a través de él.

La permeabilidad magnética en el espacio vacío denotada como ( $\mu_0$ ) se relaciona con la permeabilidad relativa (que no es el vacío)  $\mu_r$  tal que  $\mu_r = \mu/\mu_0$  y no tiene unidades. Asimismo, el comportamiento magnético de un sólido depende de los momentos magnéticos de los átomos o iones que contiene.



Por otro lado, es posible expresar la relación entre B y H en términos de un parámetro geológico, la susceptibilidad magnética  $X_m$ ; que en esencia hace referencia que tan susceptible es un material de ser magnetizado. Ahora, es común que en el espacio vacío se asuman  $\mu_r = 1$  y  $X_m = 0$ ;  $k$  tampoco tiene unidades. Existen también las susceptibilidades negativas.

Magnetización y magnetismo dentro de un material.

Al introducir ciertos materiales en un campo magnético, estas adquieren propiedades magnéticas, lo que se conoce como magnetismo inducido. En algunos casos, este magnetismo desaparece una vez que la sustancia se retira del campo. Sin embargo, hay materiales que pueden retener una parte del magnetismo incluso después de haber sido alejados del campo inductor. Por otro lado, existen sustancias que tienen propiedades magnéticas de manera independiente, ya sea en presencia o ausencia de un campo magnético.

La intensidad de la magnetización se refiere al momento magnético inducido por unidad de volumen y es directamente proporcional a la fuerza del campo magnético inductor H, y está dada por la expresión:

$$\left(\frac{P}{v} \cdot F\right) = I = KH \dots (13)$$

**Ecuación de la Intensidad de magnetización (13):**

La intensidad de magnetización  $I$  tiene relación directa con la susceptibilidad de las rocas y es de fundamental importancia para describir el estado magnético de las masas rocosas; donde la constante de proporcionalidad  $K$  es el término de susceptibilidad magnética y una medida del grado de magnetización de un cuerpo. Por definición  $I$  es proporcional a la intensidad del campo magnético externo y su dirección se alinea con la dirección de dicho campo.

## Susceptibilidad magnética.

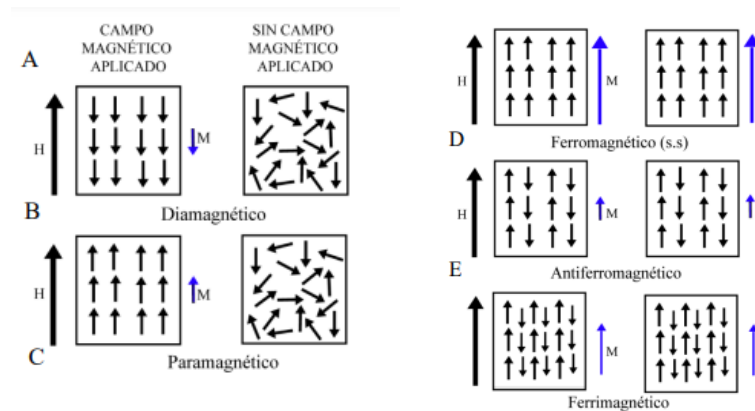
Cuanto mayor sea la concentración de magnetita u otros minerales ferromagnéticos en una roca, mayor será su susceptibilidad magnética y, por lo tanto, mayor será la inducción y remanencia de la magnetización que tiene diferentes direcciones y magnitudes. Materiales ferromagnéticos como la magnetita, ferrita y ciertos metales de aleación permanente tienen una alta susceptibilidad magnética, lo que significa que responden más fácilmente a un campo magnético.

La permeabilidad magnética ( $\mu$ ) está relacionada con la susceptibilidad magnética ( $X_m$ ) a través de la siguiente ecuación:

$$\mu = \mu_0 (1 + X_m) = 1 + 4\pi X_m \dots (14)$$

**Relación entre permeabilidad y susceptibilidad magnética (14)**

En función de la susceptibilidad magnética se pueden distinguir tres clases principales de comportamiento magnético: diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo.



*Ilustración 11. Distintos comportamientos de la materia. Flecha negra H (campo magnético aplicado) y flecha azul M (magnetización adquirida). A) Diamagnetismo. B) Paramagnetismo. C) Ferromagnetismo. D) Antiferromagnetismo. E) Ferromagnetismo. Modificado de Tarling, 1993.*

Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo.

Las sustancias diamagnéticas tienen susceptibilidades magnéticas muy pequeñas y negativas. Al ser colocadas en un campo magnético externo, los electrones orbitales giran en dirección opuesta al campo. El campo magnético dentro de estas sustancias desaparece tan pronto como se retiran del campo que lo inducía. En los materiales diamagnéticos, el momento magnético de todos los átomos es cero, por lo que a menudo se les considera sustancias no magnéticas. Algunos ejemplos de sustancias diamagnéticas que ocurren de forma natural son el cuarzo, el grafito, el yeso y el mármol.

Los materiales paramagnéticos tienen susceptibilidades magnéticas pequeñas y positivas. Cuando se colocan en un campo magnético externo, los electrones en giro de un átomo se alinean parcialmente con el campo. El paramagnetismo depende de la temperatura: a temperaturas más altas, el alineamiento de los electrones se desordena. Estos materiales pierden su magnetismo una vez que se retira el campo externo, pero aún poseen un momento magnético neto en ausencia de un campo externo. Algunos ejemplos de sustancias paramagnéticas son la pirita, la blenda de zinc y la hematita

Los materiales ferromagnéticos son los que muestran mayores efectos magnéticos en presencia o ausencia de un campo, estos tienen una susceptibilidad magnética positiva muy alta. Los electrones orbitales se alinean rápidamente en la dirección del campo magnético externo, podemos dividirlos en tres subgrupos: (i) ferromagnéticas, (ii) antiferromagnéticas y (iii) ferrimagnéticas. En cuerpos ferromagnéticos, los dipolos magnéticos se alinean rápidamente de manera paralela en presencia de un campo magnético externo y son afectados altamente por la temperatura. En los materiales antiferromagnéticos, los dipolos se alinean de manera antiparalela, cancelando los efectos magnéticos netos. Por último, las sustancias ferrimagnéticas son aquellas en las que los momentos magnéticos del material son desiguales y se encuentran en direcciones opuestas, lo que genera un momento magnético neto. Debido a la cancelación parcial, las sustancias ferrimagnéticas son menos magnéticas que las ferromagnéticas. Metales como el hierro, cobalto y níquel, así como aleaciones metálicas, son materiales con alta permeabilidad magnética. Minerales como la magnetita y titanomagnetitas son altamente permeables y se consideran minerales ferrimagnéticos, mientras que la hematita es una sustancia paramagnética.

### 3.4 Propiedades magnéticas y eléctricas de las rocas.

#### 3.4.1 Geoelectricidad

Las tormentas eléctricas son una clara evidencia de que existe un campo eléctrico en nuestro planeta, cuando se llevan a cabo descargas eléctricas y los apreciamos como rayos. Debido a que el campo actúa de forma radial hacia el centro de la Tierra, su comportamiento es como el de una esfera cargada negativamente. Se ha establecido que la atmósfera tiene una carga positiva mientras que la litosfera o tierra sólida es opuesta, así las partículas que colisionan en la superficie producto de recibir energía de rayos cósmicos o de llamaradas solares en altas magnitudes se aceleran aún más al interactuar con el campo eléctrico del planeta y al impactar se neutralizan. Resultando en la aproximación de que la Tierra se comporta como un conductor uniforme.

Los minerales que componen las rocas de la corteza poseen propiedades eléctricas específicas y su comportamiento depende de las condiciones en las que se encuentra. Las que de ellas se consideran importantes son la conductividad y su recíproco la resistividad, parámetros que han sido útiles para los estudios geofísicos. La resistividad es la propiedad más importante, se mide en ohms u ohmios como la resistencia medida entre dos caras opuestas de un cubo de materia unitaria. Mientras que su inverso, la conductividad en los minerales y rocas se pueden clasificar como metálica o electrónica. La resistividad se afecta por factores como composición mineral constitutiva en las rocas, el agua presente en los poros, volumen y disposición de estos. Por ejemplo, la calcopirita tiene una resistividad de  $1 \times 10^{-1}$  ohms-cm similar a la del agua salada, pero hasta  $10^6$ . Esto es teóricamente pues en la naturaleza el arreglo de sustancias minerales puede contrastar en diferentes órdenes. (Cantos Figuerola, 1973).

#### Resistividad aparente

En un medio espacio de conducción idealmente uniforme, las líneas de flujo de corriente se corresponden con un patrón dipolo y la resistividad establecida con una disposición de cuatro electrodos es la auténtica resistividad del medio espacio. Sin embargo, en escenarios reales, la resistividad puede ser muy uniforme debido a diversas litologías y

estructuras geológicas. No se considera esta complejidad al medir la resistividad utilizando un método de cuatro electrodos, que asume que el suelo es homogéneo. La medición resultante es la resistividad aparente de un medio espacio uniforme equivalente, y usualmente no refleja la auténtica resistividad de ninguna zona del suelo. (Lowrie, 2007).

“El método para medir la resistividad del suelo al pasar la corriente y medir el voltaje entre un solo par de electrodos conectados a tierra no funciona, debido a las resistencias de contacto que dependen de la humedad presente y el área de contacto. El problema se puede evitar si se realizan mediciones de voltaje entre un segundo par de electrodos utilizando un voltímetro de alta impedancia. Tal voltímetro no atrae prácticamente ninguna corriente, y la caída de voltaje a través de los electrodos es insignificante. Las resistencias en los electrodos de corriente limitan el flujo de corriente, pero no afectan los cálculos de resistividad. Por esto se necesita un factor geométrico para convertir las lecturas obtenidas con estas matrices de cuatro electrodos a resistividad aparente  $\rho$ . El resultado de cualquier medición única de un terreno homogéneo es una resistividad constante”. Señala Milsom (1996).

En una roca, si se considera un conductor eléctrico, existe una serie de factores que se mencionan resumidamente; estos influyen la respuesta eléctrica para todo el agregado de materia que compone una roca:

- La resistividad de los minerales que forman la parte sólida de la roca
- La resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca
- La porosidad de la roca.

### 3.4.2 Geomagnetismo.

Una roca se describe como un conjunto variado de minerales, principalmente silicatos o carbonatos en la matriz, que son diamagnéticos. Entre ellos se encuentran minerales secundarios como arcillas, que son paramagnéticos. La susceptibilidad magnética de una roca proviene principalmente de estos minerales constituyentes, pero las propiedades magnéticas remanentes se deben a una pequeña dispersión de minerales

ferromagnéticos, así las diferentes concentraciones de estos minerales y de la matriz resultan en una amplia variedad de susceptibilidades magnéticas en las rocas. (para verificar valores consultar anexos). El método magnético utilizado en la geofísica aplicada detecta cambios espaciales en la magnetización de rocas y suelos. Dekkers (1997) y Clark (1997) en Milsom (1996) ofrecen análisis fundamentales sobre el origen y las características de los minerales magnéticos, con aplicaciones significativas en la geofísica de exploración y en estudios ambientales. En general, los óxidos de Fe-Ti desempeñan un papel dominante en el magnetismo de las rocas. Los minerales con hierro son comunes en suelos y sedimentos, afectando significativamente sus propiedades magnéticas y, por ende, sus características geofísicas magnéticas. (Mark E. Everett, 2013).

Nuestro planeta posee un campo magnético que es un vector, para el cual expresamos su magnitud como **B** en nanoteslas. Si bien la unidad de 1 Tesla es comparablemente grande a la intensidad del campo magnético terrestre que se encuentra en los  $6 \times 10^{-5}$  Teslas, es por esto por lo que los magnetómetros actuales tienen una sensibilidad aproximada de  $10^{-9}$  T, llamado nanotesla; unidad que en la práctica los geofísicos se utiliza para expresar la intensidad del campo magnético de la Tierra. En tiempos pasados se utilizó la unidad *gauss* para expresar las unidades del campo magnético, en el sistema c.g.s., que equivalía a  $10^{-4}$  T. Otra unidad convencional en la exploración geofísica era los gammas ( $\gamma$ ) equivalentes a  $10^{-5}$  *gauss*. Formalmente se utiliza la unidad de nanoteslas (nT). El campo se puede expresar en sus componentes cartesianes, tomando el norte y el este geográfico en las componentes geomagnéticas de forma paralelas y la vertical en dirección descendente. Los elementos del campo geomagnético se pueden apreciar en la ilustración 12 en coordenadas esféricas, de esta manera la magnitud del vector magnético esta dado por la fuerza de campo **F**, definido por dos ángulos. La declinación **D** es el ángulo entre el meridiano magnético y el meridiano geográfico; la inclinación **I** es el ángulo que se forma entre el vector magnético y la horizontal.

Como el campo magnético se describe como un vector potencial que tiene distintas contribuciones en su resultante, externas e internas. Aquellas contribuciones de las fuentes magnéticas fuera de la Tierra tienen el nombre *de campo geomagnético de origen externo*, y en las contribuciones internas del potencial magnético del planeta se define el *campo de potencial magnético de origen interno*. Este mismo potencial no puede ser

medido directamente, y sus componentes se miden en observatorios magnéticos ubicados en los hemisferios norte del planeta en su mayoría. De manera similar con los datos que obtuvo Gauss en 1838 y los actuales en distintas partes del mundo, se concluye que las aportaciones externas en el potencial magnético total o resultante son insignificantes y/o despreciables ante las aportaciones internas. Los campos potenciales mejor conocidos son: el campo magnético, eléctrico y gravitacional. (Lowrie, 2007).

Esta expresión formidable de Gauss expreso el potencial del campo geomagnético como una serie infinita de términos con diferentes valores para  $l$  y  $n$  en coordenadas esféricas desde el observador; que divide el campo en distintos componentes que disminuyen a diferentes radios o al incrementar la distancia del centro del planeta. El análisis detallado matemática y físicamente es complicado y va más allá de la extensión de este marco.

Se expresa como:

$$W = R \sum_{n=1}^{n=\infty} (A_n r^n + \frac{B_n}{r^{n+1}}) \sum_{l=0}^{l=n} Y_n^l (\theta, \varphi) \dots (15)$$

**Magnitud del potencial geomagnético expresado en coordenadas esféricas (15)**

En donde  $R$  es el radio de la Tierra en cualquier punto.

De modo que para entender las aportaciones en la ecuación (14), de manera rápida, si observamos desde la superficie de la esfera, como sería el caso en nuestro planeta; las constantes  $A_n$  describe las partes del potencial magnético que surgen de fuentes de campos magnéticos fuera de la Tierra; llamado campo geomagnético de origen externo. Las constantes  $B_n$  describen las contribuciones del potencial magnético de fuentes dentro de la Tierra, esta parte es llamada campo geomagnético de origen interno. Denominamos fuentes de campo potencial a cualquier campo físico que obedece la ecuación de Laplace. (Hinze et al., 2012).

Los campos potenciales ya sea de gravedad, magnéticos o eléctricos pueden ser expresados por la ecuación de Laplace o de Poisson según sea el caso, y serán ocasionados por un ensamble de fuentes distribuidas de manera compleja. Ahora, las fuentes de campos potenciales son campos físicos que obedecen la ecuación de Laplace. (Hinze et al., 2012).

El campo potencial  $\varphi(x, y, z)$ , en un espacio libre y sin fuentes obedece a la ecuación de Laplace que se expresa como:

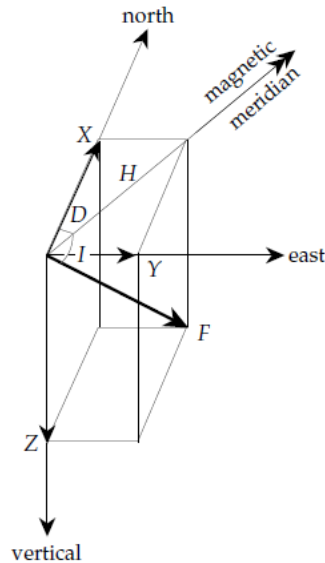
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \dots (16)$$

**Ecuación de Laplace para la función de campo potencial (16)**

A diferencia de un espacio con fuentes presentes, donde el potencial satisface a la ecuación de Poisson:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\rho(x, y, z) \dots (17)$$

**Ecuación de Poisson para la función de campo potencial (17)**



*Ilustración 12. Definición de los elementos geomagnéticos. Componentes cartesianas norte (X), este (Y) y verticalmente hacia abajo (Z), o mediante los ángulos de declinación (D) e inclinación (I) junto con la intensidad total del campo F.*



## Campo magnético principal interno

El campo magnético principal surge como teoría a partir de la revisión de los coeficientes y longitudes de onda de Gauss para campos no dipolares, indicando que principalmente es por el núcleo externo que fluye constituida principalmente por hierro y otros elementos de densidades similares, además el análisis de meteoritos indica un porcentaje de níquel y la información de las ondas sísmicas que atraviesan el planeta sugieren un núcleo sólido interno de hierro puro. Para la generación del campo magnético los parámetros importantes del núcleo son su temperatura, viscosidad y conductividad eléctrica.

Se plantea que el principal campo magnético de la Tierra es generado por corrientes eléctricas en su núcleo conductor. A pesar de que el núcleo es un buen conductor, el actual sistema eléctrico en su interior pierde energía de manera continua debido a la disipación óhmica. La energía eléctrica perdida se convierte en calor, contribuyendo al equilibrio térmico del núcleo. Las ecuaciones de electromagnetismo aplicadas al núcleo indican que una corriente eléctrica en su interior se extinguiría en aproximadamente 10,000 a 20,000 años si no se mantuviera activa. La evidencia paleomagnética de rocas magnetizadas, respalda la existencia de un campo geomagnético desde la época precámbrica, es decir, hace unos 3000 millones de años que se regenera o ha mantenido.

## Campo magnético externo

El campo magnético externo se ha logrado medir con satélites y naves espaciales, pero no tiene una forma regular, es afectado por el viento solar con una velocidad relativa a la Tierra de 450 km/s, este viento solar son partículas eléctricas cargadas que el Sol emite de manera constante y correctamente es llamado plasma, que es materia ionizada que interactúa con el campo magnético terrestre en una región que denominamos magnetosfera a alturas mayores a los 6 mil km. Es por esto por lo que nuestro campo magnético actúa como escudo ante las radiaciones extraterrestres, muchas de estas longitudes de ondas largas y cortas interactúan en lo que llamamos ionosfera para que la radiación no alcance la superficie, debido a esto fenómenos como las auroras boreales o australes se forman y dan ese espectáculo visual tan impresionante. Debido a la rotación de la Tierra, estas moléculas ionizadas, emiten electrones que generan poderosas corrientes eléctricas que se disipan transmitiendo a través de las componentes

horizontales y verticales de la ionosfera, generando fluctuaciones en el campo magnético superficial en el periodo de un día. A esta dependencia del tiempo en la variación del campo geomagnético se le conoce como variación diurna o diaria. La magnitud de la variación diurna depende de la latitud en la que se observa. Debido a que excede en gran medida la precisión con la que se miden los campos magnéticos durante los estudios, la variación diurna debe compensarse corrigiendo en consecuencia las mediciones de campo. La intensidad del efecto depende del grado de ionización de la ionosfera y, por tanto, está determinada por el estado de actividad solar. (William Lowrie, 2007).

### Magnetización remanente de las rocas

Los tipos significativos de magnetismo remanente en geología se desarrollan en momentos clave de la historia de una roca, como durante su formación o alteración posterior. Este magnetismo remanente puede ser extremadamente estable a lo largo del tiempo. La magnetización que una roca adquiere al formarse o poco después se llama magnetización primaria y ocurre encima del punto de Curie hasta la temperatura del medio o superficie de los minerales magnéticos que constituyan la roca. En cambio, la magnetización que se desarrolla en un momento posterior se denomina magnetización secundaria. Ejemplos de remanencia primaria incluyen la magnetización permanente, que las rocas ígneas adquieren durante su enfriamiento, y la magnetización remanente adquirida por sedimentos durante o poco después de su deposición. Las remanencias secundarias pueden originarse por cambios químicos en la roca durante la diagénesis, metamorfismo o debido a procedimientos de muestreo y laboratorio. A partir de esta remanencia magnética en las rocas sabemos que existe un contraste en la densidad del campo magnético al interior del planeta y en la corteza; de esta manera las anomalías magnéticas resultan del contraste en la magnetización cuando rocas con diferentes propiedades magnéticas están adyacentes entre sí. Para poder apreciar esto se hacen mediciones con equipos llamados magnetómetros. (Isunza Manrique, 2017; Lowrie, 2007).

### 3.5 Fundamentos teóricos de la geofísica de superficies y los métodos potenciales.

Los métodos geofísicos son herramientas que responden a las propiedades físicas de las rocas en la subsuperficie del medio. El subsuelo de forma general, el agua subterránea, las secuencias sedimentarias, las cavidades y los yacimientos minerales o hidrocarburos, son explorados con métodos que se clasifican en dos tipos: activos y pasivos. Los métodos pasivos miden las variaciones asociadas al campo natural que existe en la Tierra como la gravedad y el magnetismo. Los métodos activos, por otro lado, como la sismología donde se generan señales artificiales que son transmitidas a través del subsuelo y cambian con el paso de los materiales en los que viajan y son detectadas por equipos especializados para la interpretación. Para aplicaciones cercanas a la superficie, la alta sensibilidad de la instrumentación actual permite identificar estructuras e incluso unidades litológicas alteradas antropogénicamente. La geofísica aplicada cerca de la superficie o geofísica de superficies (*NSG*, por sus siglas en inglés *near-surface geophysics*) es utilizada ampliamente en la búsqueda de recursos y mapeo geológico. (Mark E. Everett, 2013).

Por un lado, el descubrimiento de la conductividad del suelo y el desarrollo metodológico de las prospecciones se llevó a cabo a mediados del siglo XVIII, siendo la polarización inducida o espontánea la primera en utilizarse para la prospección de recursos minerales. No fue hasta inicios de 1900 que el ingeniero en minas C. Schlumberger, pionero en la metodología; fabricó electrodos impolarizables que utilizó con éxito en la prospección de yacimientos no metálicos. A partir de esos años se abrieron otras maneras de estudio como los campos inducidos o generados artificialmente, para finalmente llegar al arreglo tetraelectródico utilizando campos artificiales que desarrollaron Conrad Schlumberger y de manera independiente Frank Wenner. (Orellana, 1982).

Por otra parte, la medición o uso de las propiedades magnéticas de los minerales presentes en las rocas en la superficie se remontan a Grecia en el 300 a.C. y posteriormente reconocidas por China, al usar magnetitas y estudiar como indicadores de dirección en el 200 a.C. Los cursos de modernos de la Teoría del Potencial fueron desarrollados por los profesores Prabhat Kumar Bhattacharyya y Amalendu Roy para estudiantes de posgrado en geofísica en el Departamento de Geología y Geofísica del Instituto Indio de Tecnología de Kharagpur, India, en la década de los 50's y han sido

modificado periódicamente a lo largo de las últimas cinco décadas. De esta manera, los progresos en el estudio del magnetismo en la física han permitido a los científicos de la tierra entender mejor la forma y el origen del campo magnético de nuestro planeta, además de aplicar este entendimiento a fenómenos geológicos como la tectónica global. La comprensión física del magnetismo es crucial para áreas como el geomagnetismo, la magnetización de rocas y el paleomagnetismo. (Roy, 2019).

### **3.5.1 Prospecciones geofísicas.**

#### **3.5.1.1 Método magnético.**

El propósito de la técnica geofísica magnética es explorar la distribución espacial de rocas magnetizadas o materiales ferromagnéticos en el subsuelo, es quizás el más antiguo de técnicas de exploración geofísica. Las mediciones magnéticas son realizadas cerca de la superficie para su interpretación geológica o antropogénica en términos de los objetivos de la investigación. Este método es empleado para dar una mayor definición a las anomalías presentes en la corteza terrestre, ya que por medio de mediciones a distancias más cortas se puede ver la evolución de estas anomalías y determinar donde terminan; así también es empleada en la definición de controles estructurales. (Nabighian et al., 2005).

El estudio del campo magnético y sus efectos en la actualidad se realiza utilizando magnetómetros, que nos permiten modelar anomalías magnéticas a partir de lecturas del campo magnético total en un punto de la superficie y su posterior procesamiento. Este proceso se realiza de manera terrestre y no es complicada, sin tener en cuenta la topografía del sitio para un levantamiento terrestre, un operador podría usar un magnetómetro portátil para medir el campo en la superficie de la Tierra en puntos seleccionados en los que se hayan trazado una malla sobre alguna estructura de interés. Las mediciones también pueden ser adquiridas usando aeronaves o en naves sobre cuerpos de agua, es decir, una magnetometría aérea que suelen ser las más eficientes en la práctica, y marina utilizada a escalas mayores en la industria de exploración de

yacimientos minerales e hidrocarburos. Los magnetómetros utilizados en estudios aéreos generalmente tienen una sensibilidad más alta ( $\sim 0,01$  nT) en comparación con los empleados en levantamientos terrestres (sensibilidad de  $\sim 1$  nT), lo que compensa la disminución en la resolución debido a la mayor distancia entre el magnetómetro y la fuente de la anomalía. Los estudios magnéticos aéreos son una manera eficiente y económica de explorar extensas áreas en poco tiempo, siendo una etapa común en las primeras fases de exploración geofísica de territorios no explorados. El campo magnético sobre los océanos también puede ser observado desde el aire, aunque la mayoría de los registros magnéticos marinos se obtienen mediante estudios a bordo de barcos. En aplicaciones marinas, un magnetómetro de precesión de protones montado en un "pez" impermeable es remolcado detrás del barco mediante un cable largo. Debido a que la mayoría de los barcos de investigación están contruidos con varias cientos o miles de toneladas de acero, generan grandes interferencias magnéticas que se compensan utilizando un cable entre 150-300 metros de longitud donde el sensor navega a una velocidad operacional de 10 km/h a una profundidad de 10-20 m bajo el nivel del agua. (consultar anexo 7 para detalles).

En comparación con la reducción de los datos de gravedad, los datos de levantamiento magnético requieren muy pocas correcciones; las mediciones magnéticas podemos describirlas en 3 partes (1) la medición del campo magnético terrestre en puntos específicos, (2) la corrección de estas mediciones para compensar cambios conocidos, y (3) la comparación del valor resultante con el campo esperado en cada estación de medición. El campo esperado en cada ubicación se determina utilizando el Modelo Internacional de Referencia Geomagnética (IGRF), detallado en la Sección 3.7 La diferencia entre los valores observados y los esperados es lo que denominamos anomalía magnética.

### Magnetómetro de Precesión de protones

Hasta la década de 1940, los magnetómetros eran dispositivos mecánicos que utilizaban una aguja de brújula delicadamente equilibrada para medir el campo magnético, compensando este con una fuerza restauradora proporcionada por la gravedad o la torsión de una fibra suspendida. Estos dispositivos eran voluminosos, frágiles y de

operación lenta. Diseñados para lograr una sensibilidad óptima, se enfocaban principalmente en medir cambios en un componente específico del campo magnético, típicamente el campo vertical. Actualmente, estos magnetómetros han sido sustituidos por instrumentos electrónicos más sensibles y robustos.

Desde la Segunda Guerra Mundial, los magnetómetros sensibles han sido diseñados utilizando principios de la mecánica cuántica. El magnetómetro de precesión de protones se basa en el hecho de que el núcleo de hidrógeno, compuesto por un protón, tiene un momento magnético proporcional a su momento angular de giro. Dado que el momento angular está cuantizado, el momento magnético del protón solo puede tomar valores específicos, que son múltiplos de una unidad fundamental llamada magnetón nuclear. Este fenómeno es análogo a la cuantificación del momento magnético asociado al espín del electrón, donde la unidad fundamental es el magnetón de Bohr. La relación entre el momento magnético y el momento angular de giro se conoce como relación giromagnético ( $\gamma_p$ ). La cual es la una unidad conocida con un valor:  $\gamma_p = 2.67513 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ .

El magnetómetro de precesión de protones tiene un diseño simple y robusto. El sensor consiste en un matraz que contiene un líquido rico en protones, parecido al agua. Alrededor del matraz están enrollados un solenoide magnetizante y una bobina detectora (ver anexo 8); algunos diseños utilizan el mismo solenoide alternativamente para magnetizar y detectar. Cuando se activa la corriente en el solenoide magnetizante, se crea un campo magnético del orden de 10 nT, que es aproximadamente 200 veces más fuerte que el campo de la Tierra. El campo alinea los momentos magnéticos de los protones a lo largo del eje del solenoide, que está orientado aproximadamente de este a oeste, perpendicular al campo magnético terrestre. Una vez que se interrumpe el campo magnético, los momentos magnéticos de los espines de los protones comienzan a precesar bajo la influencia del campo magnético terrestre, de manera similar a cómo lo hace una peonza en el campo gravitacional. Esta precesión ocurre a una frecuencia conocida como frecuencia de precesión de Larmor. (Lowrie, 2007). El movimiento de los momentos magnéticos induce una señal en la bobina del detector, la cual se amplifica electrónicamente. La frecuencia de precesión se mide con precisión contando los ciclos durante un intervalo breve de tiempo.

La fuerza del campo magnético medido,  $B_t$ , es directamente proporcional a la frecuencia de la señal ( $f$ ), que puede expresarse como:

$$B_t = f \frac{2\pi}{\gamma p} \dots (18)$$

Flujo de campo magnético medido por un magnetómetro (18)

Como se describe en el libro de Lowrie (2007), el campo magnético de la Tierra varía entre 30,000 y 60,000 nanoteslas (nT), con una correspondiente frecuencia precesional de aproximadamente 1250 a 2500 Hz, dentro del rango de audiofrecuencia. La medición precisa de esta frecuencia proporciona una sensibilidad instrumental de alrededor de 1 nT, pero requiere unos segundos de observación. Aunque el magnetómetro de precesión de protones ofrece un valor absoluto del campo magnético, no proporciona un registro continuo debido a su principio de funcionamiento. Sin embargo, su portabilidad y simplicidad son ventajas significativas para su uso en campo. Tanto el magnetómetro de compuerta de flujo como el de precesión de protones son ampliamente utilizados en estudios magnéticos, ofreciendo sensibilidades comparables de 0,1 a 1 nT. A diferencia del magnetómetro de compuerta de flujo, que mide la componente del campo a lo largo de su eje, el magnetómetro de precesión de protones es un magnetómetro de campo total y no puede medir componentes individuales del campo magnético.

#### 3.5.1.2 Método eléctrico.

Los métodos de prospección eléctrica o también denominados geoelectrónicos son utilizados para obtener magnitudes de variables electromagnéticas en la profundidad del subsuelo a través de mediciones en superficie mediante señales inducidas.

En nuestro planeta existen corrientes eléctricas (telúricas) naturales y por lo tanto voltajes o diferencias de potencial naturales, que se pueden ver afectadas por actividades antrópicas como se ya han descrito anteriormente. Actualmente la resistividad es la que se utiliza para definir características del medio en estudio. El uso de sondeos profundos son útiles para conocer las propiedades de la estructura interna de la Tierra con fines de investigación científica, medio ambiental y comercial también. Las anomalías eléctricas

se presentan o son visibles cuando existen cuerpos conductivos como diques o materiales ígneos, que encajonan rocas con composiciones minerales diferentes; presentando contrastes en las respuestas resistivas. Además, el agua presente en los poros de las rocas suele afectar la respuesta eléctrica comúnmente por la presencia de electrolitos.

Aunque existen diversas formas de clasificar los métodos que, en rigor son todos electromagnéticos; se divide en los de campo natural y artificial. Este último se divide en campos constantes y variables. En general se pueden aplicar en distintos sitios como lagos, minas y desde vehículos aéreos, pero también desde la superficie del terreno en campo o en el laboratorio.

Para este caso de estudio se abordará solo lo respectivo a los métodos de resistividades de corriente continua, los sondeos eléctricos verticales; donde se toma como estación un punto sobre un terreno para obtener un modelo compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad y limitados por medios estratificados.

Respecto a la profundidad de investigación, la profundidad máxima alcanzada depende principalmente del espaciamiento entre los electrodos de corriente. A mayor separación AB, mayor penetración de corriente y mayor volumen de terreno investigado.

El arreglo electródico de con 4 electrodos consta de dos electrodos de corriente (A-B) y dos electrodos para el potencial (CD), como se explica gráficamente en la ilustración 13. Comúnmente existen 3 configuraciones, Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo, cada uno espaciados diferente en sus electrodos de manera lineal.

Al utilizar dos pares de electrodos, uno para generar corrientes artificiales controladas que se adaptan a las curvas patrón de resistividades subsuperficiales para poder medir la diferencia de potencial con el otro par de electrodos entre las superficies equipotenciales, en lugar de solo fiarse de las corrientes naturales. (Lowrie, 2007).



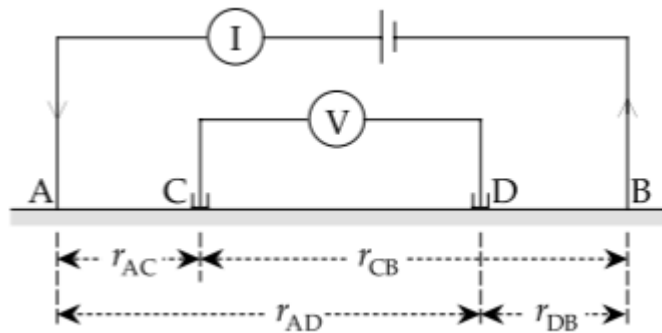


Ilustración 13. Configuración general de 4 electrodos para mediciones de resistividad. Consiste en un par de electrodos de corriente (AB) y un par de electrodos de potencial (CD). Modificado de Lowrie (2007).

Las variables de corriente, voltaje y distancias se miden en campo, excepto la resistividad que es obtenida por la siguiente ecuación:

$$\rho = 2\pi \frac{V}{I} \left\{ \left( \frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{CB}} \right) - \left( \frac{1}{r_{AD}} - \frac{1}{r_{DB}} \right) \right\}^{-1} \dots (19)$$

Ecuación para la resistividad aparente en un arreglo tetraelectrónico (19)

La ecuación (18) se simplifica en:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \dots (20)$$

Ecuación para el cálculo de la resistividad aparente (20)

De tal forma que el circuito de emisión formado por el equipo conectado a los electrodos suministra una corriente eléctrica de intensidad constante **I**, con una fuente que alimenta los electrodos AB. Las resistencias generadas por el amperímetro, el cable, los electrodos y demás resistencias óhmicas se denominan **R**, que por ser tan pequeña es despreciable excepto en las generadas por los electrodos en la práctica, limitando la intensidad de corriente en distancias kilométricas debido a que las resistencias del cable aumenta con esta relación.

Finalmente, la forma de solucionarlo no es aumentar el voltaje sino disminuir las resistencias de contacto. Para esto existen procedimientos como: clavar a más profundidad los electrodos (no los cercanos), humedecer los sitios de electrodo-suelo con agua salada. (Orellana, 1982).

La configuración Schlumberger que se visualiza en la ilustración 14 queda de la siguiente manera considerando las ecuaciones 18 y 19.

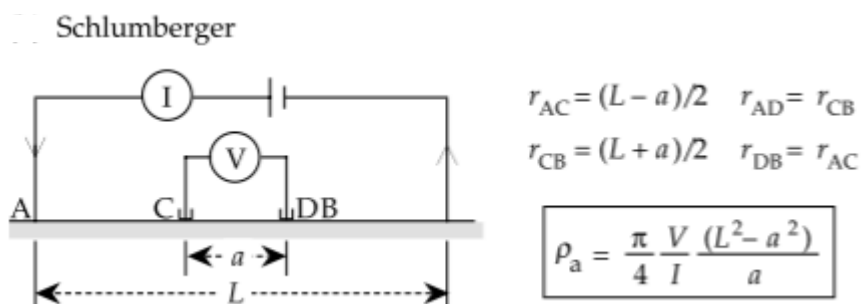


Ilustración 14. Esquema de arreglo Schlumberger. Modificado de Lowrie (2007).

Esta configuración es más utilizada en sondeos eléctricos verticales debido a su alcance en profundidad que permite tener lecturas de la variación resistiva de capas planas y los efectos superficiales son menores. Al incrementar las distancias de los electrodos de corriente y recepción progresivamente, las líneas penetran con más profundidad pero depende de la distribución vertical de las propiedades eléctricas. Finalmente, antes de obtener modelos computarizados; uno de los pasos al obtener mediciones de SEVS en una situación de dos o más capas del subsuelo es la interpretación de las curvas teóricas, graficando en planos logarítmicos la resistividad aparente en función de la distancia electródica AB. De esta manera, se denomina curva de SEV, curva de campo o curva de resistividad aparente. (Cantos Figuerola, 1973).

En las limitaciones del método se puede resaltar:

- Es un método unidimensional, por lo que asume capas horizontales planas (aunque en la realidad esto no siempre ocurre).
- La resolución disminuye con la profundidad.
- Zonas con resistividades similares pueden generar ambigüedades en la interpretación.

## Resistivímetros y toma de datos

En las mediciones de resistividad sin exigir una exactitud alta, se puede disponer de un voltímetro, miliamperímetro, electrodos metálicos (barras de acero), cables de suficiente longitud y baterías secas. Los instrumentos actuales tienen dispositivos que controlan los potenciales naturales, por lo que no es necesaria cautela al registrar las medidas por estas variaciones o por condiciones de temperaturas elevadas; de manera que al hacer lecturas, este potencial natural debe ser reducido o controlado en cero. En su mayoría incluyen GPS y también los diferentes arreglos existentes (dipolo-dipolo, Wenner, polo aislado) para poder hacer mediciones que tengas otros objetivos; como la polarización inducida, calicatas eléctricas, tomografías, con el fin de generar modelos en 2D y 3D en software especializados y apropiados también de acuerdo los objetivos del estudio.

La compañía *Iris Instruments*, por ejemplo, provee de equipamientos para estudios geoelectricos como el *Syscal Pro* que se muestra en el anexo 9, que ya incluyen fuentes de poder internas de hasta 250 W a 2500 mA, facilitando el transporte, instalación y uso del equipo. Adicionalmente se pueden programar automáticamente para realizar las lecturas cada cierto intervalo de tiempo desde milisegundos según el objetivo debido a que llegan a tener desde 4 hasta 12 canales receptores. Estas series de pulsos se ejecutan con el intervalo establecido por los equipos para evitar la polarización de las partes. Por último, los carretes de cables que se utilizaban décadas atrás para medir el potencial y transmitir corriente se han sustituido por cables denominados inteligentes, por el hecho de tener tecnología que permite monitorear los cableados antes y durante las mediciones, incluso funciones avanzadas de seguridad y calidad. Así lo describe el sumario de operaciones para este equipo propiedad de Iris Instruments (2003).

Si bien en campo cada sondeo debe identificarse por ubicación, orientación, el entorno general debe describirse claramente además de cualquier peculiaridad, se deben dar las razones de la elección de una orientación particular; y en el caso de sondeos que usan el arreglo Schlumberger el monitoreo de las posiciones de los electrodos.

Finalmente, al registrar las resistividades por punto medido permite obtener las curvas patrón. Estas se obtienen según un modelo físico simple que toma en cuenta el terreno horizontal, contacto entre distintas capas en horizontal y con última capa de espesor

infinito. Se describen a continuación los tipos de curvas para 3 y 4 capas como señala Orellana (1982), de manera resumida.

Las curvas de tres capas se caracterizan por 3 puntos de inflexión señala Cantos Figuerola en (1973) y se clasifican de siguiente modo en 4 tipos:

- Tipo H para  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$
- Tipo K para  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$
- Tipo A para  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$
- Tipo Q para  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

El modelo de 4 capas sigue el orden anterior y se ejemplifica en 8 tipos de acuerdo con los establecido por Orellano-Mooney en Cantos Figuerola (1973): HK, KH, QH, AK, HA, QK, QQ, AA. Y brevemente se establece lo siguiente:

- AA se define como:  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$
- HK se define como:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$
- KH se define como:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$
- HA se define como:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$

### **3.5.2 Tratamiento y filtrado de datos geofísicos.**

#### **3.5.2.1 Método magnético.**

Las lecturas magnéticas en áreas urbanas suelen estar afectadas por campos magnéticos generados por piezas de hierro y acero. Aunque estos materiales no sean visibles, los perfiles obtenidos a lo largo de carreteras suelen ser considerablemente distorsionados en comparación con los obtenidos en áreas abiertas a solo 10 o 20 metros de distancia. Debido a que las fuentes de interferencia suelen ser pequeñas y pueden estar enterradas a menos de un metro de profundidad, los efectos varían ampliamente. En estudios cercanos a la superficie, es frecuente la caracterización de estructuras

geológicas alargadas magnetizadas, como fallas, diques, así como objetivos de interés arqueológico, geotécnico, como muros o cimientos enterrados y objetos metálicos enterrados, como tuberías. (Milsom, 1996; Reynolds, 1997).

El campo magnético total registrado por los magnetómetros incluye el campo terrestre, las estructuras magnéticas locales y las variaciones diurnas. Para interpretar las estructuras magnéticas, se ajustan los datos restando las variaciones temporales y el valor teórico del IGRF correspondiente al momento del levantamiento. El resultado, la anomalía magnética, se usa para crear un mapa de anomalías asociado a las estructuras geológicas del área.

#### Campo de referencia geomagnética internacional (IGRF)

El campo geomagnético de la Tierra cambia de forma continua e impredecible en escalas de tiempo que van desde meses hasta millones de años. Para tener en cuenta los cambios temporales en escalas de tiempo de unos pocos años, el IGRF se revisa periódicamente, normalmente cada cinco años; estas variaciones son descritas experimentalmente en las ecuaciones del *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) por sus siglas en inglés. La comunidad científica utiliza habitualmente el IGRF para estudiar, el clima espacial, la inducción electromagnética y las anomalías magnéticas locales en la litosfera. (Alken et al., 2021).

El NOAA calcula los valores del campo mediante un modelo de investigación compilado a partir de estudios magnéticos satelitales, marinos, aeromagnéticos y terrestres que intenta incluir las suficientes variaciones de la corteza en el campo magnético para aparecer en el Modelo Magnético Mundial. La liga al sitio web<sup>1</sup> que se empleó en la presente investigación para obtener los valores de IGRF, utilizando las coordenadas y altura con hora y fecha de levantamiento de datos:

<sup>1</sup> (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>).

## Variación diurna

La interacción del viento solar con el campo magnético de nuestro planeta se lleva a cabo en la región llamada magnetosfera, unos cientos de kilómetros hacia el espacio; actúa como un escudo protector de la radiación proveniente del Sol. Existen longitudes de onda corta que logran atravesar sin llegar a la superficie, mientras que otras como los rayos X y los rayos  $\gamma$  (gamma) se reflejan e interactúan con moléculas de nitrógeno y oxígeno en la zona que conocemos como ionosfera entre 100 y 1500 metros sobre la superficie. Estas partículas cargadas generan corrientes eléctricas que generan campo magnético cerca de la superficie que, en conjunto con la rotación de la Tierra, generan fluctuaciones entre 10 y 30 nT en el campo geomagnético observado en el periodo de un día. Esta variación del campo dependiente del tiempo se denomina variación diurna y magnitud depende de la latitud donde se mide, es por esto, que deben aplicarse correcciones diurnas a las mediciones/lecturas realizadas. Además, deben incluirse correcciones por anomalías en la actividad solar, como las tormentas solares magnéticas.

## Anomalía magnética y separación residual-regional

La medición del campo con equipos terrestres o marinos para estudiar las propiedades de la corteza ha sido esencial en las ciencias de la tierra, así se busca determinar las llamadas anomalías magnéticas o residuos, que son los valores que se obtienen después de sustraer de cada medición las contribuciones del campo principal, la externa y la inducida.

Cuando hacemos lecturas con un magnetómetro, el campo magnético total ( $B_{obs}$ ) debido a todas las fuentes presentes. En el caso de ideal de un cuerpo único afectando el magnetómetro, tendríamos:

$$B_{obs} = B_T + \Delta B_T \dots (21)$$

Expresión para lectura de campo magnético (21)

Donde,  $B_T$  es el campo geomagnético regional; y  $\Delta B_T$  la perturbación generada por el cuerpo magnetizado enterrado (fuente de interés).

Para obtener la anomalía generada por el cuerpo es necesario usamos la corrección por IGRF o campo regional en el mismo punto. Tenemos la anomalía de campo total **A**:

$$A = B_{obs} - B_T,$$

$$\text{Si } B_T \gg \Delta B,$$

$$\Delta A \approx \Delta B_T \cdot \hat{B} \dots (22)$$

Obtención de anomalía (22):

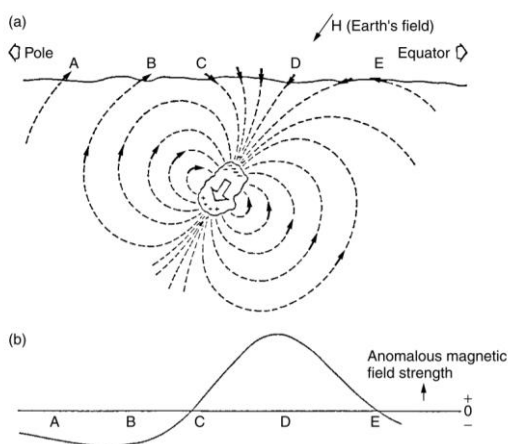
Si el campo regional es mucho mayor que el campo perturbador,  $\Delta A$  (anomalía de campo total) es aproximadamente igual a uno de los componentes del campo producido por las fuentes del campo magnético anómalo. Las anomalías típicas medidas por aire o en mar, tienen un rango de magnitud de unos pocos a varios miles de nT, pero rara vez superan los 5.000 nT. Por lo tanto, la condición de que  $B_T \gg \Delta B$  es por lo tanto confirmado por estudios magnéticos de la corteza terrestre. Finalmente, se tiene que definir que la función de anomalía de campo total ( $\Delta A$ ) es armónica bajo ciertos parámetros, considerando que la función **A** es un campo potencial con componentes armónicos en sí mismo, por lo tanto, cada componente de  $\Delta B_T$  es armónico:

$$\nabla^2 \Delta A = 0 \dots (23)$$

Expresión armónica del campo (23)

En conclusión, la anomalía de campo total en cualquier punto es aproximadamente igual que la componente del campo anómalo en la dirección del campo regional si el campo de anomalía es reducido en comparación con el campo regional. Asimismo, la anomalía total del campo es un potencial y cumple con la ecuación de Laplace, si la dirección del campo es constante a lo largo de las dimensiones de la investigación. Las dos condiciones generalmente prevalecen en los análisis de escala local y regional. (Blakely J., 1996).

La separación regional-residual es un paso crucial en la interpretación de datos magnéticos para todas las aplicaciones. Históricamente, este problema se ha abordado utilizando métodos gráficos simples o diversas herramientas matemáticas para obtener la componente regional del campo. Aunque este desafío ha sido ampliamente abordado en datos de gravedad, las técnicas propuestas también son aplicables eficazmente a estudios magnéticos. La forma de una anomalía magnética varía significativamente con la inclinación del campo magnético terrestre, así como con las variaciones en la forma y la orientación de magnetización del cuerpo fuente. (Nabighian et al., 2005). Se pueden emplear bocetos simples para obtener estimaciones visuales aproximadas de la anomalía generada por cualquier cuerpo magnetizado como se muestra en la ilustración 15.



*Ilustración 15. Esquema de representación de una anomalía magnética en latitudes medias debido a una magnetización. a) Campo inducido a 60°. b) Perfil de anomalía. Modificado de Milsom (1996).*

Debido a que cada polo magnético positivo está equilibrado por un polo negativo en algún lugar, el flujo neto involucrado en cualquier anomalía es cero. En las partes centrales de una lámina magnetizada uniforme, los campos de los polos positivo y negativo se cancelan mutuamente, y solo los bordes son detectados por los estudios magnéticos. Por lo tanto, los cuerpos magnetizados que yacen en posición plana a menudo producen poca o ninguna anomalía significativa.

Los filtros espectrales son eficaces para aislar y caracterizar anomalías como el RTP, filtros de derivadas, etc. Transforman la información del dominio del espacio y el tiempo al dominio de longitud de onda y frecuencia mediante la transformada de Fourier. (Blakely J., 1996).



## **Aplicación de filtros.**

### **Reducción al Polo.**

Un filtro de reducción al polo (RTP, por sus siglas en inglés) esencialmente elimina el efecto de la dirección del campo geomagnético en el sitio de medición. Al igual que una anomalía de gravedad, la forma de una anomalía magnética depende de la forma del cuerpo causante. Sin embargo, a diferencia de una anomalía de gravedad, una anomalía magnética también está influenciada por la inclinación y declinación de la magnetización del cuerpo, así como por la inclinación y declinación del campo magnético local de la Tierra, y la orientación del cuerpo respecto al norte magnético. Para simplificar la interpretación de la anomalía, retomando a Baranov & Naudy (1957) en Baranov *et al* (1964), propusieron un enfoque matemático conocido como reducción al polo. Este método transforma la anomalía magnética observada en la anomalía que se mediría si la magnetización y el campo magnético ambiental fueran ambos verticales, como si las mediciones se hicieran en el polo magnético.

Hoy en día, la reducción al polo se aplica rutinariamente a casi todos los datos magnéticos, excepto aquellos recolectados en latitudes magnéticas altas.

### **Derivadas.**

Otro método utilizado para mejorar la respuesta magnética de las características geológicas cercanas a la superficie en la zona de estudio es el uso de filtros de derivadas, el cual mejora los bordes tomando en cuenta los gradientes que se forman por la presencia de materiales con diferentes propiedades magnéticas.

Comúnmente la derivada vertical de primer orden es un filtro utilizado para mejorar la forma de las anomalías. Este método utiliza el principio de que las anomalías relacionadas con fuentes más profundas atenúan más lentamente que las relacionadas con fuentes superficiales. Aplicar los métodos de gradientes verticales o primeras derivadas en los datos magnéticos resulta útil para mejorar la visualización de las anomalías locales debido a que aproxima los bordes o márgenes de las fuentes magnéticas. (Grauch et al., 2009).

Respecto a los filtros de gradientes o derivadas horizontales transforma el efecto de magnetización de estos cuerpos de la sección transversal poligonal en el equivalente de láminas magnetizadas delgadas situadas a lo largo del perímetro de los cuerpos causales. (Nabighian, 1972).

### **Señal Analítica.**

Utilizar la señal analítica al procesar datos magnéticos es un concepto matemático que ha ayudado aproximadamente desde la década de 1980 en la interpretación de anomalías de cuerpos magnéticos en dos dimensiones cuando Nabighian (1972, 1984) la desarrolló estimando la posición y la profundidad de las fuentes. La principal ventaja que descubrió en este método fue que la apariencia de la señal analítica relacionada con los cuerpos causales variaba según su posición, pero no sus direcciones de magnetización. Este filtro que también es llamado gradiente total es la combinación de los gradientes horizontales y verticales obtenidos previamente. El uso de este filtro ha probado ser de utilidad por diversos autores, para definir límites de los cuerpos que causan anomalías como lo demuestra Ndlovu *et al* (2015) e Isunza Manrique (2017).

### **Estimación de profundidad de fuentes.**

La estimación de la profundidad es uno de los principales objetivos de la interpretación magnética. El análisis espectral por definición es el proceso de separar una señal en sus componentes con distintas frecuencias, de esta manera, el espectro de una onda de energía describe; por ejemplo, el cambio de cantidades de la energía o la amplitud en función de algún parámetro; normalmente se utiliza la frecuencia o el número de onda. El análisis mediante la teoría de Fourier ha sido indispensable para el tratamiento de señales en geofísica, principalmente en los campos magnéticos y gravitacionales. (Velázquez-García, 2021).

Las primeras técnicas para la búsqueda de la profundidad hasta la fuente eran principalmente de naturaleza gráfica y aplicables solo a anomalías de una sola fuente (Henderson & Zietz, 1948; Peters, 1949; Vacquier *et al.*, 1951; Smellie, 1956; Hutchison, 1958; Grant & Martin, 1966; Koulomzine *et al.*, 1970; Barongo, 1985). (Blakely J., 1996).

Estas técnicas estimaban los parámetros de la fuente observando varios atributos de la anomalía, como la coincidencia de curvas, la pendiente de línea recta, el ancho medio, la amplitud, la extensión horizontal entre varios puntos característicos, entre otros. Determinar la profundidad de las anomalías es crucial debido a su posible relevancia científica, académica o económica. Para obtener información más precisa sobre su morfología y ubicación en el subsuelo, se utilizan diversos métodos para estimar diferentes profundidades.

#### Cálculos de profundidad mediante el espectro radial de potencia

Todas las técnicas mencionadas anteriormente se centran en determinar la ubicación, forma y profundidad de objetivos magnéticos específicos. Un enfoque diferente considera que la anomalía magnética es causada por un conjunto de fuentes en lugar de fuentes individuales. Entonces, para poder trabajar con el espectro de las señales de campo magnético obtenidas, hacemos uso de la Transformada rápida de Fourier.

Spector *et al* (1970) introducen un método que estima la profundidad de la fuente directamente de la pendiente del logaritmo del espectro radial de potencia, metodología utilizada en este trabajo. Este asume que los parámetros de las fuentes (como largo, ancho y profundidad) siguen distribuciones probabilísticas. Específicamente, el logaritmo natural del espectro de densidad de potencia radial en función del número de onda tiene una pendiente lineal aproximadamente el doble de la profundidad máxima del conjunto.

El espectro de potencia promedio (amplitud al cuadrado) calculado en diferentes direcciones acimutales. Se grafica usualmente como el logaritmo del poder radial contra número de onda. En general los valores declinan rápidamente con el incremento del número de onda (lo cual representa fuentes profundas y/o extensas) declinando más gradualmente para números de onda mayores (lo que representa fuentes someras más locales). Cuando el número de onda se expresa en ciclos/unidad de distancia, la profundidad de la fuente está dada por la pendiente del logaritmo del espectro de potencia dividido entre  $4\pi$  si el número de onda se expresa en ciclos/unidad de distancia. Para múltiples conjuntos, se obtienen pendientes lineales que son aproximadamente el doble de las profundidades máximas de los distintos conjuntos magnéticos señala Treitel *et al*, (1971) en (Spector & Grant, 1970).

Las profundidades pueden ser estimadas con mayor precisión al eliminar progresivamente los efectos de los conjuntos más superficiales y corregir el espectro de potencia para el ancho del cuerpo de la fuente. Programas de computadora para la estimación de profundidad de fuentes a partir de perfiles magnéticos utilizando estadísticas en ventanas fueron desarrollados por Phillips (1979) y Blakely & Hassanzadeh, (1981). (Nabighian et al., 2005).

Para obtener las profundidades de las fuentes magnéticas, a los espectros de potencia se les calcula la transformada rápida de Fourier (FFT) como se describe en (Espinoza Ortiz, 2024).

Al obtener la transformada de Fourier de  $f(x, y)$  está dada por:

$$\bar{f}(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(ux + vy)} dx dy \dots (24)$$

**La transformada de Fourier (24)**

Usando la relación recíproca de la transformada de Fourier se tiene:

$u$  y  $v$  son frecuencias angulares en los ejes  $x$  e  $y$ , respectivamente.

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \bar{f}(u, v) e^{i(ux + vy)} du dv \dots (25)$$

**Transformada de Fourier inversa (25)**

El espectro de potencia derivado de la transformada de Fourier se expresa:

$$E(u, v) = \bar{f}(u, v) \cdot \bar{f}'(u, v) \dots (26)$$

**Espectro de potencia (26)**

Como se describe al inicio de este apartado, esta metodología considera un ensamble de prismas con características geométricas de la profundidad hasta espesores definidos

que generan la anomalía magnética, estimando que el valor espectro depende del basamento. Así, podemos describir la función de densidad de potencia  $\langle E \rangle$ , se puede expresar en términos de sumatoria del espectro  $E$ .

$$\langle E \rangle = \int \dots \int E \cdot \phi(a, b, t, h, I, D, k) dv \dots (27)$$

**Expresión para la densidad de potencia (27)**

Donde:

$I$  = ángulo de inclinación magnética.

$D$  = ángulo de declinación magnética.

$k$  = es el número de onda

$\phi$  = es la función de probabilidad adjunta, de los factores geométricos  $a$ ,  $b$ ,  $t$ ,  $h$ .

Cada uno de los parámetros opera de la forma:

$$\phi(a, b, t, h, I, D, k) = \phi(a) \cdot \phi(b) \dots \phi(h)$$

El cálculo estimado del ensamble espectral para un intervalo determinado es:

$$\langle E(r, \theta) \rangle = 4r^2 k^{-2} \langle e^{-2hr} \rangle \cdot \langle (1 - e^{-tr})^2 \rangle \cdot \langle S^2(r, \theta) \rangle \dots (28)$$

**Ensamble de espectro de potencia en un intervalo determinado (28)**

$\langle \rangle$  el ensamble para cada parámetro. Y se divide en tres expresiones:

a) para la profundidad es:  $\langle e^{-2hr} \rangle$

b) para el espesor se tiene:  $\langle (1 - e^{-tr})^2 \rangle$

c) la amplitud del espectro:  $\langle S^2(r, \theta) \rangle$

si se tiene en cuenta el cálculo del espectro de la forma descrita, la dependencia de  $\theta$  en  $\langle E \rangle$  se elimina, quedando:

$$\langle E(r) \rangle = 4r^2 k^{-2} \langle e^{-2hr} \rangle \cdot \langle (1 - e^{-tr})^2 \rangle \cdot \langle S^2(r) \rangle$$

Donde:

$S(r)$  = factor del tamaño horizontal,

$\langle E(r) \rangle$  = espectro de potencia promedio.

De lo anterior, se destacan tres factores asociados a la profundidad (h), ancho (t) y amplitud (S), de los que depende el espectro de potencia. Por lo que Spector *et al* (1970) establecen que para el factor de profundidad es:

$$\langle H(r) \rangle = \langle e^{-2hr} \rangle = e^{-2hr} \left( \sin h \left( \frac{2r\Delta h}{4r\Delta h} \right) \right)$$

$$\text{Si } \Delta h = < 0.5, h \text{ y } r = 1/h$$

El termino dominante es el exponencial y se obtiene:

$$\langle e^{-2hr} \rangle = e^{-2h}$$

Donde:  $h$  = es la profundidad promedio del ensamble de prismas.

Al obtener logaritmo de la expresión anterior:

$$m = -2h \quad \text{o} \quad m = -4\pi h, \text{ de acuerdo con autores}$$

donde:

$h$  = profundidad del basamento

$m$  = pendiente del espectro radial.

Esta última expresión obtenida se modifica en (29) y utiliza más adelante para la obtención de profundidades de fuentes magnéticas a partir de los datos obtenidos en la campaña magnética.

$$h = \frac{m}{4\pi} \dots (29)$$

**Expresión para promedio de profundidades de fuentes magnéticas (29)**

### 3.5.2.2 Método eléctrico.

El procesamiento de los datos obtenidos en campo tiene como objetivo generar modelos de resistividad en profundidad que representen las capas del subsuelo. Los datos geoelectricos ya sean de tomografías, sondeos verticales o calicatas, incluso algunos electromagnéticos no necesitan de correcciones mayores o significativas comparadas con los datos de gravedad o magnéticos, además existe la ventaja que los equipos de corriente continua no tienen deriva instrumental. Los levantamientos actuales con equipos automáticos y modernos que cuentan con tecnología avanzada para una adquisición “limpia” o lo más acertada posible permiten trabajar los datos directamente al descargarlo de la base de datos de la consola o al crear la base de datos si la toma se hizo de manera manual.

Los equipos que son manuales, en su mayoría requieren regular los potenciales naturales, en su caso anotarlos para hacer las correcciones correspondientes teniendo disponibles los datos de corriente y voltaje durante las mediciones. En campo es indispensable utilizar una hoja o papeleta de adquisición de los datos de SEVS como se muestra en la ilustración 16, los datos indispensables a registrar son: intensidad de corriente, potencial inducido, potencial natural para con estos calcular la resistividad aparente y por supuesto las separaciones electródicas AB y MN.

| SCHLUMBERGER SOUNDING DATA SHEET |           |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
|----------------------------------|-----------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------|-----------|----------|--|
| area:                            |           | site:                |                       | VES n°:               |              |        |           |          |  |
| operator:                        |           |                      | equipment:            |                       |              | date:  |           |          |  |
| AB/2<br>m                        | MN/2<br>m | V <sub>AB</sub><br>V | I <sub>AB</sub><br>mA | V <sub>MN</sub><br>mV | RHO<br>ohm.m | Q<br>% | M<br>mV/V | Mem<br># |  |
| 2                                | 0.5       |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| 3                                | 0.5       |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| 4                                | 0.5       |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| ...                              | 1         |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| 5                                | 0.5       |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| ...                              | 1         |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| 6                                | 1         |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| 8                                | 1         |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| ...                              | 2         |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| 10                               | 1         |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| ...                              | 2         |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| 15                               | 2         |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |
| ...                              | 5         |                      |                       |                       |              |        |           |          |  |

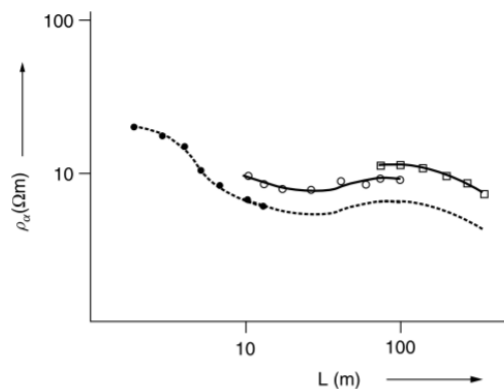
Ilustración 16. Hoja ejemplo para el registro de datos en SEVs en campo. Tomado de (Iris Instruments, 2003).

Con los datos de resistividad calculados, el siguiente paso es graficar las curvas de resistividad (ver ilustración 17).

## Curvas de resistividad aparente

El primer paso es graficar la resistividad aparente contra la semidistancia entre los electrodos ( $AB/2$ ) en escala logarítmica. Esto genera una curva de resistividad, la cual es comparada o ajustada con modelos teóricos para inferir el número de capas, su resistividad y espesor.

Se utilizan las distancias registradas en nuestra tabla de adquisición, desde el primer dato al último; promediando los datos (que suelen ser dos) en donde se realiza el empalme con la finalidad de obtener una curva uniforme-continua y no segmentada. Este permite visualizar la distribución de los datos y preliminarmente asociar un perfil de resistividades con el número de capas presentes en la zona del sondeo.



*Ilustración 17. Construcción de una curva de resistividad en arreglo Schlumberger al sobreponer los segmentos de curva obtenidos con diferentes separaciones de electrodos de potencial.*

Obtenidas las curvas, estos mismos datos se cargan en softwares para el procesamiento de datos geoelectrónicos en 1D como el *IP12WIN*, *ZONDIP1D*, por mencionar algunos. Estos programas permiten manipular las gráficas para poder elaborar el modelo interpretativo de espesores geoelectrónicos. A partir de las curvas se tiene que deducir la distribución vertical de resistividades en el punto sondeado partiendo de la curva de resistividades aparentes obtenidas en los SEVS. La resolución de este problema que se puede llamar inverso exige la previa solución y estudio del problema directo, esto es el de determinar la curva de resistividades aparentes que se obtendrán con un dispositivo determinado sobre un subsuelo. Los criterios para ajustar los espesores y resistividades se toman de la geología conocida y de la distribución de los datos adquiridos.



## 4. Capítulo 4. Metodología y procesamiento.

La metodología empleada en la presente tesis sigue una serie de pasos ordenados de tal manera que facilite el cumplimiento de los objetivos propuestos. Para este caso de estudio, debido a que no se buscan zonas de interés minero, sino definir las estructuras presentes en el subsuelo al correlacionar los datos magnéticos con la geología.

### 4.1 Planificación de adquisición de datos en campo.

Previo al inicio de los recorridos en campo y el levantamiento de datos se solicitaron los permisos correspondientes para desplazarse en la zona de estudio, que pertenece a dos agencias municipales, San Pablo y Trinidad de Viguera ya que los lineamientos proyectados se prolongan sobre propiedades privadas y terrenos de cultivo. El correcto acercamiento con los pobladores locales fue parte importante de este proyecto.



*Ilustración 18. Ubicación de los perfiles geofísicos en la zona de estudio. Líneas rojas: lineamientos magnéticos proyectados. Líneas blancas: Falla Oaxaca de la cartografía SGM. Línea magenta: Cizalla San Pablo. Línea Morada: Perfil geoelectrico. Líneas azules: escurrimientos. Imagen tomada y modificada de Google Earth el 20/01/2023. Datos vectoriales INEGI 2020.*

Con el fin de hacer un reconocimiento extenso de la zona de estudio se realizaron salidas de campo en múltiples ocasiones y vuelos con dron. Los recorridos geológicos ejecutados en diversas ocasiones en distintas estaciones del año refuerzan el entendimiento del arreglo geológico local en el marco regional expuesto en los capítulos 2 y 3; además con el propósito de visualizar y delimitar la forma de adquisición magnetométrica y sondeos. De manera favorable en la zona de estudio no existen obstrucciones significativas (líneas eléctricas, vehículos, estaciones eléctricas, o infraestructura que modifiquen las lecturas a realizar) para el levantamiento de datos. Se generó el mapa para la adquisición mostrado en la ilustración 18.

- Equipo e instrumentación para la prospección magnética terrestre

| <b>Equipo</b>                                          | <b>Cantidad</b> | <b>Descripción</b>                                                                                   |
|--------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Magnetómetros</b>                                   | 2               | Cada estuche contiene:<br>Consola G856 Geometrics<br>Chaleco de operador<br>Sensor<br>Y base estadal |
| <b>GPS</b>                                             | 2               |                                                                                                      |
| <b>Baterías de 12 V</b>                                | 18              | Cada magnetómetro se equipa con 9 pilas.                                                             |
| <b>Machete</b>                                         | 1               |                                                                                                      |
| <b>Pica Geológica<br/>Laptop<br/>cuaderno de campo</b> | 1               |                                                                                                      |

*Tabla 2. Instrumentación para el levantamiento magnético en campo.*

La campaña de adquisición geofísica de datos magnéticos terrestres se llevó a cabo con dos magnetómetros de precesión de protones modelos G-856 de la empresa *Geometrics*.

Las consolas al iniciar deben equiparse con 9 baterías de 12 V para su correcto funcionamiento. Se llevo a cabo el ensamble, colocación y encendido de los dos equipos; el sensor debe apuntar siempre al norte magnético en cada medición. Su operación es sencilla, pues se puede configurar para lecturas automáticas cada intervalo de tiempo o hacer lecturas manualmente, presionando READ. Las lecturas fueron ejecutadas manualmente.

Para obtener los datos de campo magnético total (CMT) en la zona de estudio utilizando se planificó lo siguiente:

El mallado se proyectó de manera digital en el mapa del sitio con 6 perfiles en dirección E-O con una longitud de 150 metros cada perfil con separación aproximada (por dificultades topográficas y la vegetación) de 10 metros.



*Ilustración 19. Equipo de magnetómetro protónico terrestre de Geometrics G-856 proporcionado por el IPN CIIDIR Oaxaca, utilizado para las lecturas en campo de este trabajo. 2023.*

Para la adquisición en campo se el día del levantamiento:

| Parámetros de campo                |                                                       |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Datum de adquisición Valor de IGRF | WGS 84<br>UTM 14 N                                    |
| Coordenadas de base magnética      | X: 740206.00 m E<br>Y: 1896719.00 m N<br>Z: 1718 msnm |
| Valor de IGRF                      | 38510.9 nT                                            |

Tabla 3. Parámetros de valores magnéticos en el sitio de adquisición.

- Equipo e instrumentación para la prospección eléctrica

La adquisición de datos geoelectrónicos mediante sondeos eléctricos verticales se realizó utilizando un resistivímetro ensamblado por el Laboratorio de Geofísica del CIIDIR IPN, que consta de dos voltímetros en la parte frontal, de esta manera se hacen las lecturas de corriente y voltaje, para calcular la resistividad aparente  $\rho$ . Como fuente de alimentación utiliza baterías de dron tipo lipo de 2.2 amperes (A); suficiente para el levantamiento propuesto.



Ilustración 20. Equipo de prospección eléctrica ensamblado y proporcionado por el IPN CIIDIR Oaxaca, utilizado para las lecturas en campo de este trabajo. 2023.



| Equipo                                    | Cantidad | Equipamiento adicional    |
|-------------------------------------------|----------|---------------------------|
| Consola de Resistivímetro                 | 1        | Brújula Brunton           |
| Carretes de cable semiautomático de 100 m | 2        | Libreta de campo y laptop |
| Carretes adicionales de 500 m             | 2        | GPS                       |
| Electrodos de acero de 30 cm              | 50       | Flexómetro                |
| Pares de Caimanes                         | 16       | Mesa y sombrilla          |
| Cintas medidoras de 100 m                 | 1        | Pica geológica            |
| Mazos                                     | 2        | 40 litros de agua con sal |

Tabla 4. Instrumentación para el levantamiento de sondeos eléctricos en campo.

Para obtener los datos geoelectrónicos mediante sondeos eléctricos verticales en la zona de estudio utilizando se planificó lo siguiente:

Dos sondeos eléctricos verticales con arreglo Schlumberger perpendiculares a la Falla Oaxaca con fin de obtener un perfil que cruce la estructura (línea estructural cartográfica) y obtener lecturas sobre los diferentes materiales litológicos. Los centros de los sondeos fueron elegidos de acuerdo con las condiciones *in situ*, donde fuera posible utilizar el equipo y maniobrar con seguridad cercano a la Falla Oaxaca.

Se establecen los siguientes parámetros:

| Parámetros de sondeos | Longitud total<br>(Apertura<br>electrónica A-B) | Coordenadas UTM |            |           |
|-----------------------|-------------------------------------------------|-----------------|------------|-----------|
|                       |                                                 | X               | Y          | Z         |
| SEV 1                 | 280 m                                           | 740079 mE       | 1896237 mN | 1700 msnm |
| SEV 2                 | 280 m                                           | 740147 mE       | 1896461 mN | 1710 msnm |

Tabla 5. Parámetros de los sondeos eléctricos verticales realizados en la zona de estudio.

## 4.2 Campaña de prospecciones geofísicas.

En las dos metodologías de prospección empleadas, los perfiles levantados se extienden sobre el plano de la Falla Oaxaca, pasando por encima de las cavidades y escurrimientos que forman Las Salinas con el objetivo de obtener lecturas en la zona de nuevo suelo mineral y el contacto geológico entre la formación sedimentaria y el complejo metamórfico como se aprecia en la ilustración 21.



*Ilustración 21. Mapa recorte del sitio de levantamiento magnético y geoelectrico en la zona de estudio con vista hacia el sur. Marcadores blancos: estación de lectura con magnetómetro. Líneas rojas: lineamientos magnéticos proyectadas. Líneas blancas: Falla Oaxaca de la cartografía SGM.*

### Prospección Magnética Terrestre

El método de levantamiento siguió lo planificado en el apartado anterior. Los perfiles magnéticos se fueron tomando como ilustra la ilustración 21. Un total de 111 datos de campo magnético total con su coordenada puntal fueron obtenidos y lecturas de la estación base magnética en dos días consecutivos que se realizó el levantamiento

magnético. No se registraron eventos externos que modificaran los datos leídos como tormentas solares o geomagnéticas.

El magnetómetro destinado a funcionar como base magnética se utiliza para la corrección de los datos, con una toma cada 30 minutos hasta terminar el levantamiento en el mismo punto para los dos días.

Para el magnetómetro rover o móvil se optó por promediar 3 lecturas por cada punto del mallado con la finalidad de adquirir los mejores datos posibles del terreno; cada punto se levantó y registró con su coordenada UTM XYZ. Se cubrió un área aproximada de 6 hectáreas en un perímetro de 1.1 km, debido a las limitaciones por colindancias. Los datos de lectura se descargaron manualmente para la creación de la base de datos, incluyendo los del magnetómetro móvil. El reporte fotográfico del levantamiento se incluye en el apartado 9 del presente.

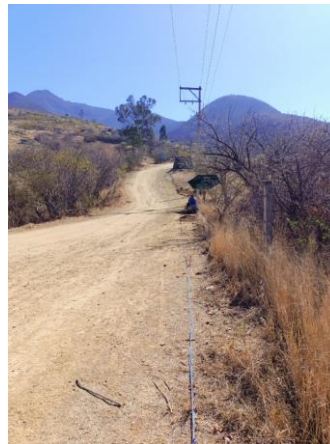
#### Prospección eléctrica mediante sondeos eléctricos verticales

La metodología empleada consistió en 2 sondeos eléctricos verticales con arreglo Schlumberger separados por una distancia aproximada de 250 metros, esto debido a limitantes en los terrenos que se atraviesan en el perfil proyectado. Cada uno tuvo una longitud AB/2 de 140 metros como máximo en cada extremo, con el objetivo de realizar lecturas de resistividad aparente a una profundidad que rebase los 50 metros. Para ambos tendidos las pendientes del terreno no excedían los 30° de buzamiento. Las condiciones climáticas recientes de sequía y el materia geológico en el sitio, para disminuir las resistencia de contacto en la fase electrodo-suelo, se hidrató con salmuera en aproximadamente 100 ml por cada electrodo y cada sondeo. La inyección de corriente eléctrica se mantuvo por 8 segundos, de manera que fluyera correctamente para obtener lecturas adecuadas del potencial. La tabla de adquisición de campo para cada sev puede consultarse en el anexo 12 y 13.

El sitio del sondeo 1 es en una sección del camino de terracería que conduce hasta el paraje “El Jarillal” en dirección Este, donde la urbanización es más escasa, y los terrenos en los alrededores son de cultivo de maíz y aprovechamiento de agave recientemente. El material en superficie corresponde a recubrimientos de tierra sobre la terracería de

composición arcillo-limosa con gravas y brechas de arenisca, mezclados con sedimentos de color blanco y gravas de composición metamórfica. Estas condiciones endurecen las capas superficiales del suelo sumado al estrés hídrico que sufrió la zona además, la erosión hidráulica es la que más impacto tiene en la zona, exponiendo en distintos sitios la roca milonítica; dificultando la colocación de electrodos.

Para el segundo y último sondeo; la vereda donde se tendieron los cables y colocaron electrodos es una colindancia entre terrenos de cultivo, haciendo que las capas entre 10 y 40 centímetros de profundidad sean una mezcla de sedimentos blandos con materia orgánica, suelos menos compactados.



*Ilustración 22. Fotografías en campo en el primer sitio SEV 1. Tendido realizado sobre la avenida que es la colindancia/limite entre Viguera y San Pablo. 2023.*



*Ilustración 23. Fotografías en campo del segundo sitio de sondeo SEV 2. El tendido se realizó sobre la vereda/camino entre parcelas y terrenos de cultivo. 2023.*



Posterior a la adquisición, el trabajo con los datos crudos se describe en el apartado a continuación.

#### **4.3 Procesamiento de los datos geofísicos.**

Habiendo terminado las lecturas en campo en la prospección magnética y eléctrica, estos se utilizan para crear la base de datos crudos que se incluyen den anexo 10 al 13, para su corrección y posterior procesamiento por separado en softwares correspondientes.

#### **Reducción y procesamiento de datos magnéticos.**

Antes de analizar la información es necesario pasarlos por un proceso mediante el cual se eliminan de las mediciones de campo magnético todas aquellas variaciones externas, dejando sólo los efectos debido a cuerpos anómalos en el subsuelo, estos cálculos se realizaron en Excel, a partir del tutorial creado por Hinze *et al* (2013).

##### **Corrección diurna**

Es una ventaja que los magnetómetros no tengan una deriva instrumental por lo que la corrección diurna solo consiste en determinar la magnitud de la variación en el tiempo del campo magnético total, causada mayormente por el campo magnético externo. Por esta razón, utilizar un segundo magnetómetro como base magnética que realiza lecturas de manera periódica o intervalo de tiempo establecido en el mismo punto, mientras que el magnetómetro móvil realiza las lecturas de los perfiles de la zona a prospectar.

Para obtener los valores corregidos ( $CMT_{CD}$ ) en nuestro sitio, es decir, sin las perturbaciones por el campo externo (variación diurna); consiste en obtener una tasa de variación diurna (TVD) con los datos de la base magnética, y una deriva de esta misma; que se puede expresar como:

$$CMT_{CD} = CMT_{obs} - (TVD) + \text{Deriva de la base}$$

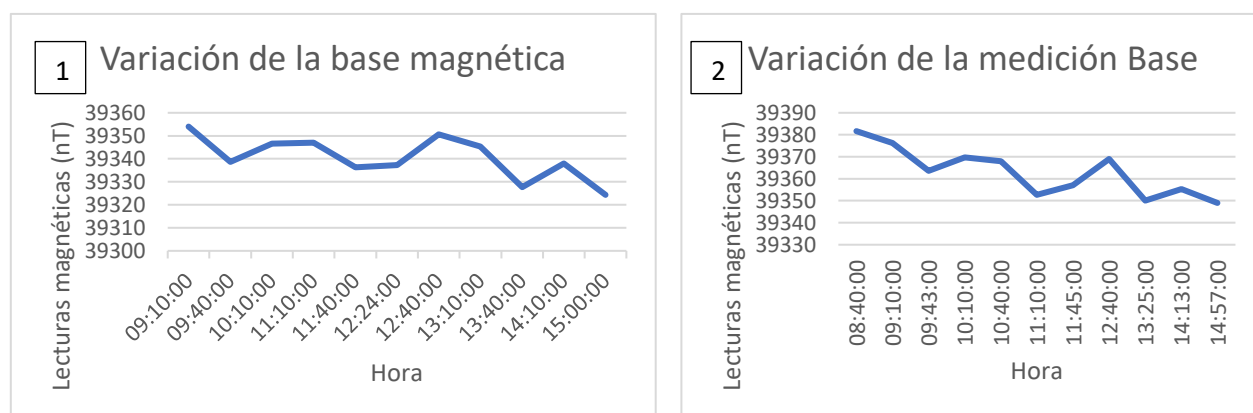
Donde  $CTM_{obs}$  se refiere a nuestra lectura promedio de los datos de campo.

La tasa de variación diurna se obtiene en grupos y usando los datos y tiempos de la base magnética. Y para la deriva de la base podemos obtenerla como:

$Base\ drift = L_{Bn} - L_{B1}$ ; donde B1 es la primera lectura de la base magnética y Bn para el loop o grupo.

Siguiendo este método se obtuvo la corrección diurna para todos los datos; mostrados en los anexos 11.

Se grafican ambos días por separado de los datos de CMT de la base magnética en el eje Y, mientras que en el eje X se encuentra la hora de cada medición.



*Ilustración 24. (1) Grafica de variación de lecturas de la base magnética del primer día / (2) Grafica de variación de lecturas de la base magnética del segundo día.*

### Corrección por IGRF y obtención de anomalía

En el apartado 3.6.3. se describe el proceso para obtener los valores de inclinación, declinación magnética y el IGRF para nuestra zona y día de levantamiento, en la página del NOAA. En el anexo 10 se muestran los valores correspondientes para el levantamiento magnético. De esta manera, utilizando los datos de campo magnético total corregidos por variación diurna obtenidos anteriormente se extrae la anomalía magnética. Restando el valor de CMT ya corregido al valor de referencia internacional (IGRF). Se expresa como:

- $AM\ (Anomalía\ magnética) = IGRF - CMT_{CD}$

Los cálculos de anomalía magnética para cada punto levantado se incluyen en los anexos.

Calculate Magnetic Field

Latitude: 17.14253827972930 ☐ S ☒ N

Longitude: 96.74211397063732 ☐ W ☒ E

Elevation: ☐ GPS ☒ Mean sea level

1711 Meters

Model: ☐ WMM (2024-2029) ☒ IGRF (1590-2029)

☐ EMM (2000-2019) ☐ WMMHR (2024-2029)

Start Date: Year 2023 Month 1 Day 27

End Date: Year 2023 Month 1 Day 28

| Magnetic Field                     |                           |                           |                         |                          |                         |                             |             |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------|
| Model Used: IGRF20                 |                           |                           |                         |                          |                         |                             |             |
| Latitude: 17.14253827972930° N     |                           |                           |                         |                          |                         |                             |             |
| Longitude: 96.74211397063732° W    |                           |                           |                         |                          |                         |                             |             |
| Elevation: 1711.0 m Mean Sea Level |                           |                           |                         |                          |                         |                             |             |
| Date                               | Declination<br>(+ E, - W) | Inclination<br>(+ D, - U) | Horizontal<br>Intensity | North Comp<br>(+ N, - S) | East Comp<br>(+ E, - W) | Vertical Comp<br>(+ D, - U) | Total Field |
| 2023-01-27                         | 3.2782°                   | 44.5430°                  | 27,447.7 nT             | 27,402.8 nT              | 1,569.6 nT              | 27,013.3 nT                 | 38,510.9 nT |
| Change/year                        | -0.0945"/yr               | -0.0196"/yr               | -59.9 nT/yr             | -57.2 nT/yr              | -48.6 nT/yr             | -77.4 nT/yr                 | -97.0 nT/yr |

Ilustración 25. Valores para el cálculo de IGRF.

## Realce y presentación de los datos

Antes de poder visualizar los datos en mallas y gráficas es necesario cargar la base de datos corregidos (anexo 11) al software Oasis Montaj. Los datos pueden ser importados desde Excel en como archivo *asci* o bien creando los canales de o columnas de datos para cada sección de manera manual.

Los canales importantes o a usar son:

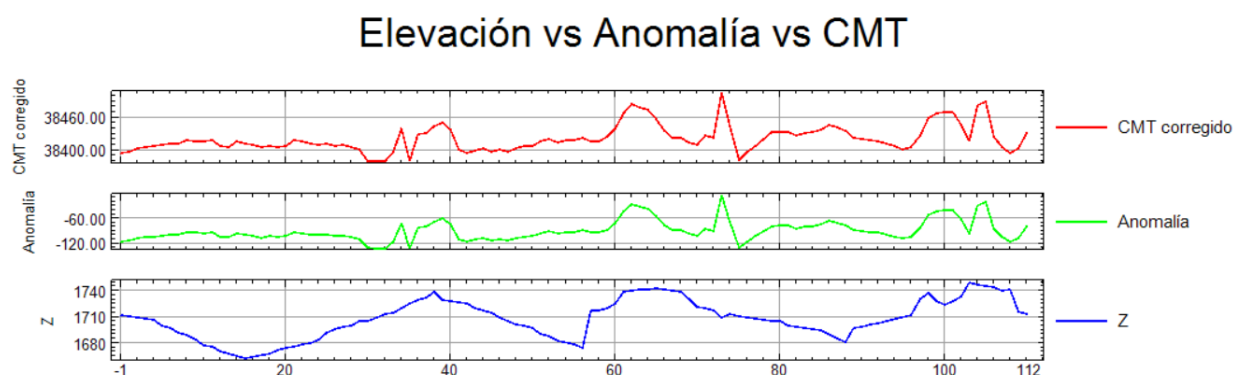
- Coordenadas UTM (X, Y, Z)
- Lecturas de campo magnético total
- Anomalías magnéticas
- Inclinação y declinación magnética
- IGRF

Así como fechas y horarios de levantamientos por punto, de manera opcional. Se debe establecer el sistema de proyección y coordenadas. Para este proyecto se utilizó el datum WGS 84 con proyección UTM en la zona 14 N, correspondiente a la zona de estudio. Los datos se encuentran en el dominio del espacio.

| ✓ D0:0 | X      | Y       | Punto | Fecha      | Z    | Hora     | Lprom nT    | CD      | CHT corregido | Anomalia | IGRF nT  | Inclinacion | Decli |
|--------|--------|---------|-------|------------|------|----------|-------------|---------|---------------|----------|----------|-------------|-------|
| 21.0   | 740055 | 1896763 | 22    | 2023/01/27 | 1676 | 11:32:00 | 38403.50000 | -14.832 | 38418.33      | -92.57   | 38510.90 | 44.543      |       |
| 22.0   | 740069 | 1896764 | 23    | 2023/01/27 | 1678 | 11:39:00 | 38398.40000 | -17.324 | 38415.72      | -95.18   | 38510.90 | 44.543      |       |
| 23.0   | 740090 | 1896763 | 24    | 2023/01/27 | 1680 | 11:44:00 | 38394.73333 | -17.578 | 38412.31      | -98.59   | 38510.90 | 44.543      |       |
| 24.0   | 740103 | 1896763 | 25    | 2023/01/27 | 1684 | 11:49:00 | 38393.23333 | -17.463 | 38410.70      | -100.20  | 38510.90 | 44.543      |       |
| 25.0   | 740120 | 1896759 | 26    | 2023/01/27 | 1692 | 11:53:00 | 38395.30000 | -17.371 | 38412.67      | -98.23   | 38510.90 | 44.543      |       |
| 26.0   | 740139 | 1896762 | 27    | 2023/01/27 | 1696 | 11:55:00 | 38391.16667 | -17.325 | 38408.49      | -102.41  | 38510.90 | 44.543      |       |
| 27.0   | 740156 | 1896761 | 28    | 2023/01/27 | 1699 | 11:57:00 | 38391.66667 | -17.279 | 38408.95      | -101.95  | 38510.90 | 44.543      |       |
| 28.0   | 740171 | 1896759 | 29    | 2023/01/27 | 1700 | 12:00:00 | 38388.16667 | -17.210 | 38405.38      | -105.52  | 38510.90 | 44.543      |       |
| 29.0   | 740186 | 1896757 | 30    | 2023/01/27 | 1705 | 12:05:00 | 38384.90000 | -17.095 | 38402.00      | -108.90  | 38510.90 | 44.543      |       |

Ilustración 26. Recorte de la base de datos creada para el proyecto en el software Oasis Montaj 6.4.2. de Geosoft Inc.

Una primera visualización de los datos magnéticos se obtiene al realizar los perfiles de elevación en Z y anomalía magnética como una previsualización del comportamiento de los datos en terreno. De manera conjunta los datos de elevación se interpolaron en el software SURFER en el que se obtuvieron los modelos topográficos 3D y de curvas de nivel incluidos en la sección de anexos 15 y 16.



*Ilustración 27. Perfiles de anomalía magnética y elevación topográfica.*

Para visualizar los valores se interpola usando el método de mínima curvatura para los valores de anomalía, campo magnéticos total y elevación de manera inicial. Para el mallado del campo magnético total se utilizó el tamaño de celda 1 y para anomalía magnética se utilizó un tamaño de celda de 3x3 al suavizarlo. En los metadatos del grid se muestra como una resolución espacial de 1 m. De forma que los mallados posteriores se obtengan al mismo tamaño de celda.

A continuación, resaltar la visualización de los datos mediante filtros escogidos en el manual de Geosoft Inc (2015) para cada mapa; se debe preparar el mallado con un pre-procesamiento de transformación, usando el menú de programas de integrados de MAGMAP en Oasis Montaj v. 6.4.2 que aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) para posteriores aplicaciones de filtros.

## Reducción al polo

Se aplicó a la anomalía magnética un algoritmo matemático desarrollado por Baranov *et al* (1964) que simula la ubicación del área en el polo norte, donde la declinación del CMT es 0° y la inclinación es 90°. Esto implica que las anomalías se posicionan directamente sobre sus fuentes. Este proceso es conocido como Reducción al Polo Magnético (RTP por sus siglas en inglés).

Se utilizaron valores decimales 3.28° para la declinación y 44.54° para inclinación magnética obtenidos con anterioridad, para el cálculo de la reducción al polo en el programa Oasis Montaj mediante un filtrado paso por paso.

## **Separación de anomalías y estimación de profundidades de fuentes magnéticas a partir de espectro de potencia.**

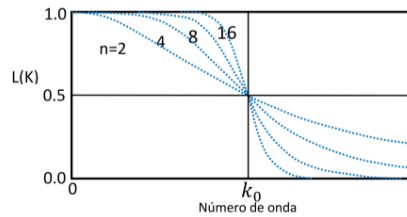
Para estimar la profundidad de basamento al mapa de reducción al polo se calculó el espectro de potencia con la transformada rápida de Fourier (FFT).

Un filtro pasa bandas o filtro Butterworth como también se le nombra, se aplica al espectro de potencia; para de esta forma separar las señales y obtener los efectos regionales y residuales. La expresión debajo ejemplifica un filtro pasa bajas en términos de número de onda, o pasa altas en términos de longitud de onda espacial.

$$L(k) = \frac{1}{1 + (k/k_0)^n}$$

Donde ***n*** es el grado del filtro Butterworth.

Al utilizar el filtro como se aprecia en la ilustración 28, se obtiene la anomalía por efecto regional y residual.



*Ilustración 28. Representación gráfica de filtro pasa banda. Modificado de (Hinze et al., 2013).*

Posteriormente se extraen los datos del espectro de potencia, que se grafican en función del número de onda. El siguiente paso es obtener diferentes pendientes o líneas de tendencia a lo largo de la curva asociadas a las fuentes magnéticas. De la expresión para una recta:  $y = mx + b$ ; donde  $m$  es la pendiente, siendo el dato de utilidad para calcular la profundidad de a fuente a partir de la expresión final obtenida en el apartado 3.6.3.2, que se basa en un ensamble de prismas que originan la anomalía.

Al haber separado las anomalías, los filtros de derivada y señal analítica se aplican sobre la residual, porque es de nuestro interés las anomalías locales que se pudieran estar relacionadas a las mineralizaciones superficiales.

Se obtienen los mapas de derivadas direccionales en direcciones Z e Y. Teniendo en cuenta que el efecto regional en la anomalía se caracteriza por variaciones graduales a gran escala en el campo magnético. La atenuación de los bordes y las variaciones en la respuesta por efecto regional no difieren visualmente de la anomalía total en este caso. Para el sitio de estudio es de esperar que se conserve un patrón regional de fondo, haciendo coherencia a que las estructuras profundas corresponden a la presencia y continuación de la Falla Oaxaca; el contacto geológico de unidades rocosas, pudiéndose ya tratar del contacto profundo estratotectónico de los terrenos Zapoteco y Cuicateco.

Para las anomalías de efecto local se obtuvieron fuentes redistribuidas. Adicionalmente se incluye el mapa de pseudogravedad en el anexo 17.

## Derivadas

Siendo uno de los objetivos definir las estructuras que generan anomalías locales y debido a que la aplicación de gradientes direccionales ha resultado de utilidad en la interpretación de las anomalías magnéticas, se obtuvieron las derivadas en las 3 direccionales utilizando la paquetería de MAGMAP en Oasis Montaj.

Inicialmente se obtuvo el mapa de la derivada vertical de primer orden, definiendo anomalías magnéticas presentes en formas pequeñas no visibles en la anomalía residual, que se delimitan en forma cónica.

La aplicación posterior de un filtro direccional horizontal en Y, resultó útil para detallar ahora los contornos de los cuerpos que generan anomalías en su desplazamiento lateral; pero al mismo tiempo se atenuaron los efectos verticales. En este caso se incluye la dirección Y para la derivada horizontal que se obtuvo con menor ruido en el anexo 20. Se relevan los lineamientos magnéticos por los cuerpos ígneos en sus disposiciones horizontales de Este-Oeste.

## Señal Analítica

La operación matemática de calcular la señal analítica al procesar e interpretar anomalías magnéticas se utiliza ampliamente, porque la forma de este mapa se relaciona directamente con la posición o ubicación de los cuerpos que las generan. De esta forma, los gradientes combinados forman la señal analítica que se le aplica a la malla de efectos residuales mediante la función de *Analityc Signal* del menú de *Grid* en Oasis Montaj. Finalmente el mapa resultante permite visualizar la distribución de las fuentes y su intensidad, que pueden corresponder a minerales ferromagnéticos para las zonas positivas.

De manera adicional, utilizando el menú de PDEPTH o profundidades de Wenner, se calculan profundidades de diques y contactos geológico de la señal analítica. Los parámetros establecidos para el cálculo se aprecian en el anexo 21 y se presenta la media y la moda de las profundidades de los diques y los contactos en la tabla 7 de los resultados.

Discusión del procesamiento de datos magnéticos.

Preliminarmente se puede comentar que los lineamientos magnéticos se relacionan con las zonas que tienen un alto gradiente, es decir que la variación fuerte que tiene el campo magnético en una distancia horizontal. Comúnmente estos altos gradientes se les relacionan con contactos geológicos y/o fallas y/o fractura, donde la Falla Oaxaca resalta con notoriedad.

### **Reducción y procesamiento de datos geoelectricos.**

La corrección de los datos geoelectricos a diferencia de los magnéticos no siempre son necesarias, dependiendo el método elegido y el equipo utilizado, resultando relativamente practico.

Previo a ingresar los datos al software de modelado geofísico se redujeron los datos. Este paso se realizó en cada sondeo y consistió en promediar los dos valores de resistividades en los empalmes a manera de suavizar la curva teórica o resistiva. Estos valores corregidos de resistividad aparente y distancias  $AB/2$  de cada sondeo se incluyen en el anexo 14. Los valores reportados en esa tabla se importaron al programa DCINV.

En los anexos 12 y 13 se presentan los valores crudos o sin reducir registrados en campo de corriente, voltaje, potencial natural y resistividad aparente calculada. Esta última siguiendo la ecuación (19).

Los datos se cargaron en los programas disponibles para su interpretación, buscando el que nos permitiera trabajar adecuadamente. Finalmente, para procesar datos de los sondeos eléctricos verticales realizados utilizando un modelo de Tierra de hasta 5 capas horizontales; se hizo uso del programa DCINV que puede manejar las tres configuraciones de medición más típicas: Schlumberger, Wenner y dipolo-dipolo; permite la optimización de parámetros y se basa en el método de inversión linealizada que se utiliza en la interpretación de datos.



Se utilizó adicionalmente el programa ZOND1DIP para obtener el perfil y una pseudo-sección geoelectrica que extrapola los dos sondeos para una visualización, aunque no muy acertada de las capas y sus espesores debido a la distancia entre sevs, pero contribuye a la ejemplificación del sitio; incluida en el anexo 23.

El perfil geoelectrico se muestra en el anexo 22, formado entre los dos sevs y tiene una dirección preferente N-S, pero con inclinación  $<10^\circ$  hacia el NE, resultando en un perfil que se extiende en dirección NE-SO.

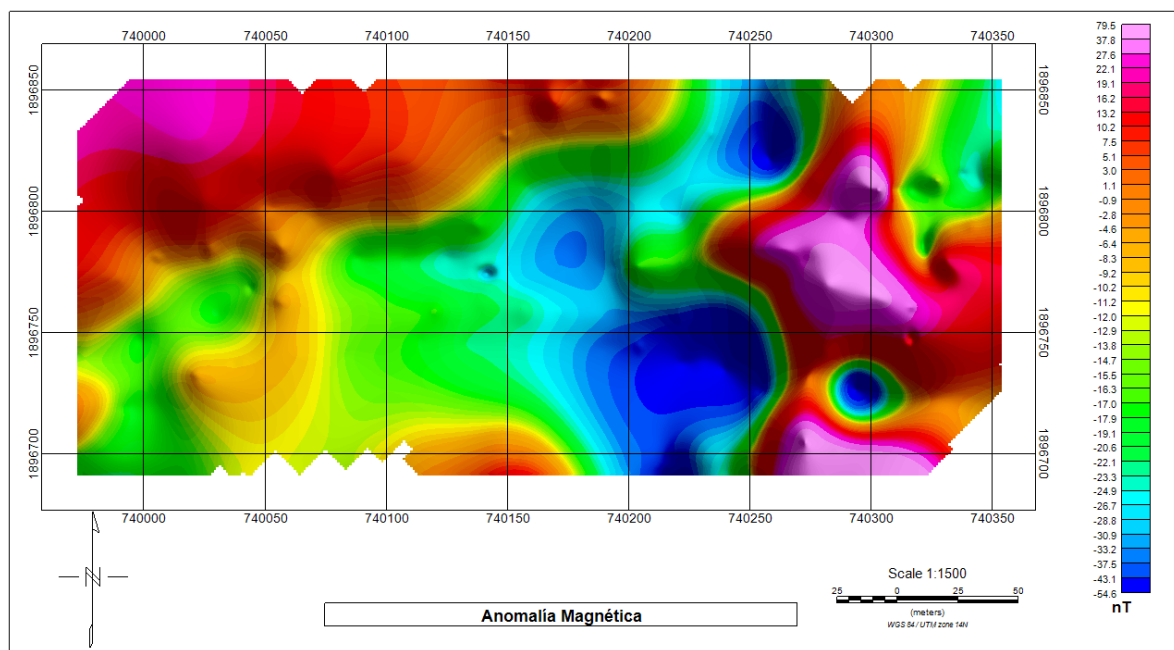
Con los datos geoelectricos, al realizar varias iteraciones en el proceso de inversión, se optó por el que proporciona modelos finales que alcanzan profundidades hasta 50 metros. Las curvas y modelos se encuentran en el siguiente capítulo de resultados.

Después de varias iteraciones y filtros, los mapas y modelo finales obtenidos del procesamiento de los datos magnéticos describen las propiedades magnéticas del subsuelo, la distribución de las unidades rocosas y bordes de los cuerpos responsables de las anomalías observadas, en conjunto con las interpretaciones de los modelos eléctricos como se aborda en los capítulos siguientes.

## 5. Capítulo 5. Resultados.

Debido a que los mapas de campo total y anomalía conservan una forma similar se muestra directamente el mapa de anomalía. En el anexo 18 se puede consultar el mapa de campo total como una primera visualización de los datos adquiridos con valores máximos en el orden de los 38517 nT que se asocian a la presencia de rocas metamórficas alteradas y 38378 nT en bajos magnéticos correspondientes a la discontinuidades.

Con estos dos mapas se aprecian contrastes resaltantes en la sección *Este*, abarcando de las coordenadas UTM Este 740200 y 740350; que se asocian a los materias litológicos presentes observados en campo, que son rocas metamórficas que forman el Cinturón Milonítico.



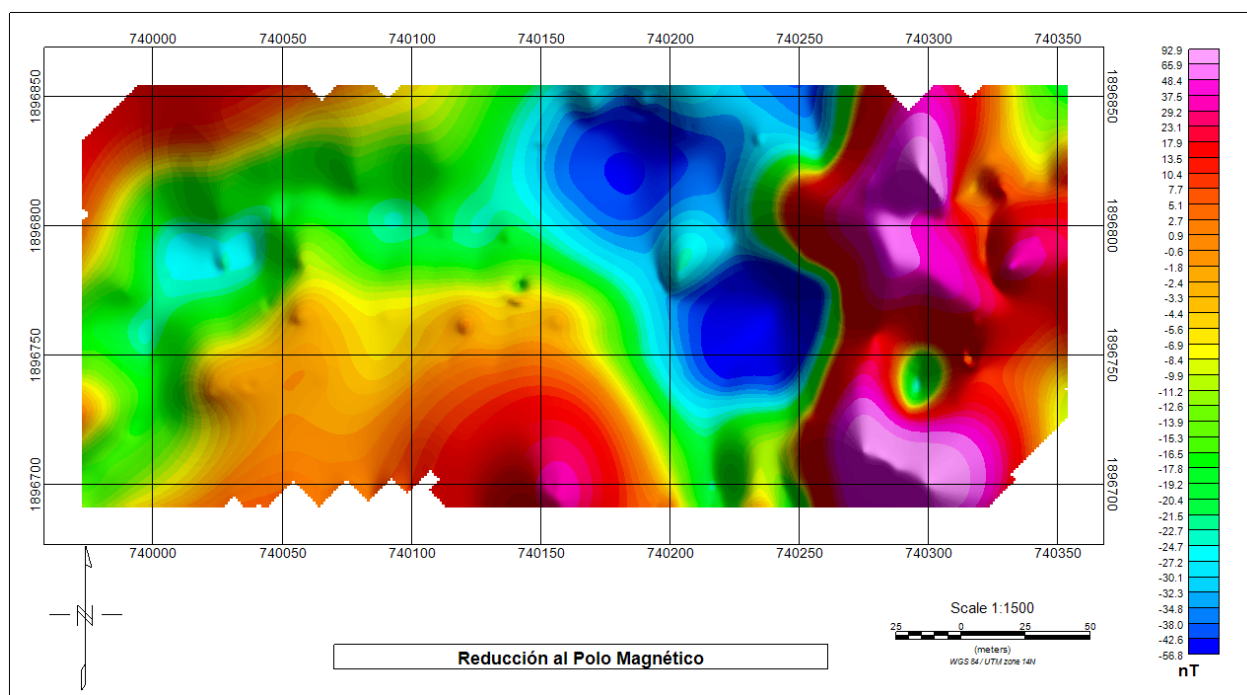
*Ilustración 29. Anomalía magnética de la zona de estudio, obtenido al realizar correcciones y sustraer el valor del IGRF.*

Para la anomalía magnética de la ilustración 29, los valores máximos en dirección positiva en el orden de los 79 nT en la parte *Este*, donde se aprecian anomalías dipolares asociadas a las intrusiones al cinturón de milonitas. La forma de la anomalía indica una

distribución de materiales con composición distinta en contacto geológico en casi todo el mapa de la ilustración 29. Las áreas con valores negativos de anomalía es notable debido a la falla y se corrobora con la geología conocida reportada por otras metodologías al estudiar la estructura; por lo tanto, se puede decir que se trata del contacto geológico de la Falla Oaxaca. Esto se describe porque los cambios en la intensidad magnética en el área central-oriental en la coordenada UTM Este 740250 metros son abruptos en cortas distancias.

### Reducción al polo

Al aplicar el filtro de Reducción al Polo (RTP) la anomalía se centra sobre el polo magnético que la genera, obteniendo el mapa de la ilustración 30.



*Ilustración 30. Anomalía magnética reducida al polo en la zona de estudio.*

Se observan cambios en la distribución de la anomalía, pudiendo apreciar mejor los dipolos que generan los altos magnéticos en el rango de 90 nT que se mantienen la sección *Este* del mapa entre la coordenadas UTM Este 740250 y 740350.

Otro dipolo de menor intensidad y tamaño se destaca en la parte central-sur del mapa cerca de la coordenada UTM Este 740150 metros, pudiéndose tratar de esta manera de cuerpos a profundidad.

Se corrobora el contacto geológico de unidades rocas sedimentarias y metamórficas al observar el contorno bien definido por la transición entre las respuestas de intensidad magnética a lo largo de la coordenada UTM Este 740250 del mapa como se señala en la ilustración 31; con transiciones en valores entre los 10 nT a -13 nT.

Por otra parte, la respuesta en bajos magnéticos podría asociarse a zonas de debilidad con valores negativos de -50 nT ubicadas entre las coordenadas UTM Este 740150 y 740250, pudiendo reflejar la presencia de cavidades y/o zonas de humedad por donde fluye el agua, provocado por la actividad/discontinuidad de la Falla Oaxaca.

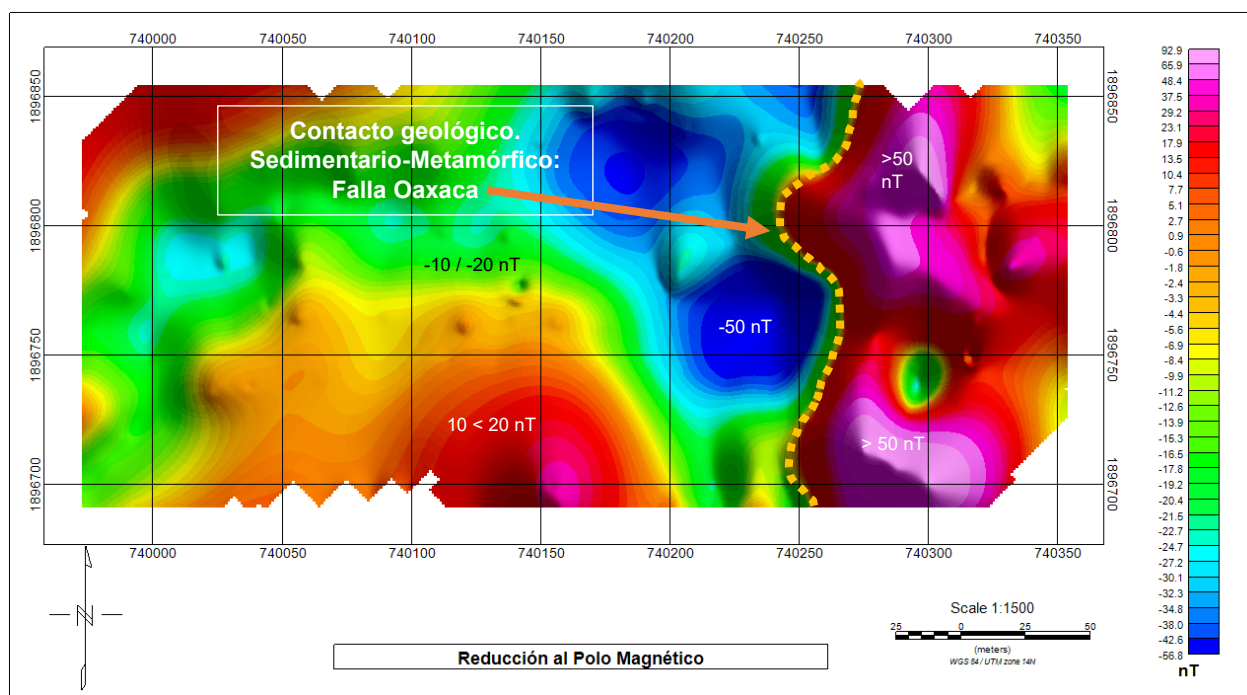


Ilustración 31. Anomalía magnética reducida al polo en la zona de estudio interpretado.

## Separación de anomalías

Después de separar los efectos regionales y locales de la anomalía magnética reducida al polo al separar las señales del espectro de potencia, se obtiene el mapa de efecto

residual que puede consultarse en el anexo 19a; el mapa de efectos regionales se incluye también en el anexo 20.

Los filtros espectrales se aplicaron sobre la anomalías residual. El mapa de anomalías locales entre las coordenadas UTM Este 740000 y 740250 se hacen visibles puntos, cuerpos irregulares alargados o semiesféricos que generan anomalías positivas que pueden definirse mejor al aplicar algún filtro. De la misma manera, las anomalías con valores positivos hacia los 30 nT se mantienen en la sección oriental en las coordenadas Este 740250 y 740350 con altos gradientes en donde se posicionan las rocas metamórficas que se intercalan con áreas de valores negativos hasta los -24 nT. Debido a la cercanía con el granito de Etlá, se puede correlacionar que las familias de fallas presentes en este zona pueden estar regidas por los mismos mecanismos de fracturamiento en las unidades superiores como se plantea Ortega-Obregón *et al* (2003).

## Derivadas

Como ya se ha descrito, de manera general aplicar filtros de derivadas amplifican las fuentes magnéticas. De esta manera se obtiene la derivada vertical de primer orden en la ilustración 32, para poder visualizar mejor los bordes de las fuentes cercanas.

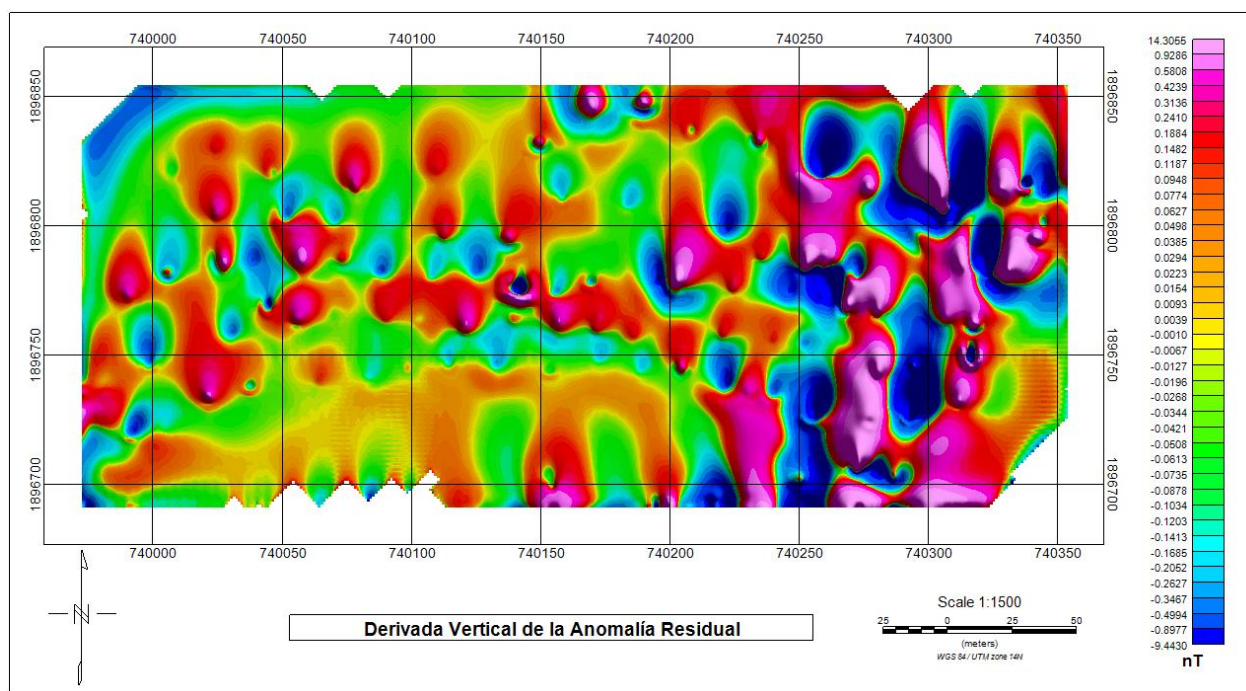
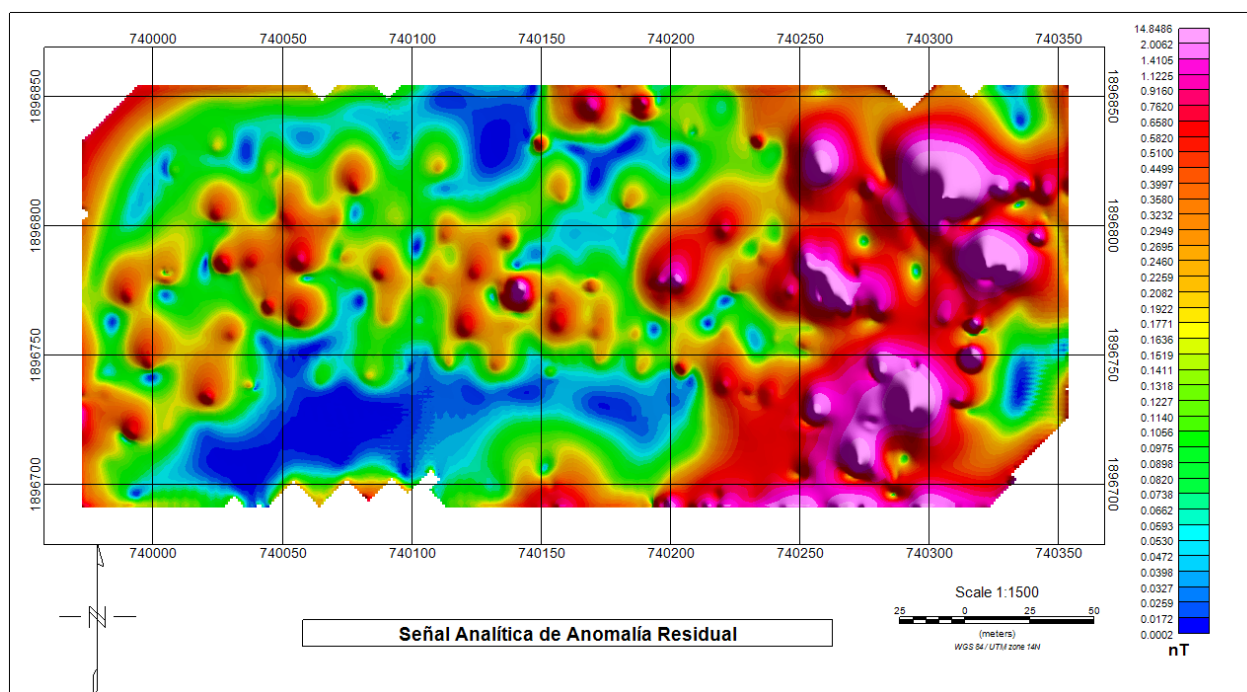


Ilustración 32. Primera derivada vertical de la anomalía local.

Inicialmente se observa que algunas estructuras se conservan, resaltan y definen en la sección Este del mapa entre las coordenadas UTM Este 740225 y 740350, al formar picos distintos separando grupos de anomalías. Con valores positivos hacia los 15 nT correlacionadas a las fuentes con alta respuesta magnética que pueden estar atravesando las unidades superiores y se desplazan a través de la falla. Para los bajos magnéticos, los valores hacia los -9 nT, asociados a discontinuidades ocasionadas por el plano de la Falla Oaxaca.

### Señal Analítica

Utilizar la señal analítica sobre el efecto residual ayuda a obtener las anomalías directamente en la ubicación de los cuerpos que las originan, que resulta de la combinación de los gradientes verticales y horizontales como se visualiza en la ilustración 33.



*Ilustración 33. Señal analítica de la anomalía residual.*



Las anomalías magnéticas positivas hacia los 14.8 nT que se mantienen entre las coordenadas UTM 740250 y 740350 Este, como se ha comentado pueden asociarse a fuentes intrusivas profundas de composición máfica, debido a la intensidad magnética. Los bajos magnéticos en todos los valores menores a 0.05 nT en coloración azul, se asocian a posibles canales, cavidades o unidades sedimentarias saturadas que rodean por el Norte y Sur los emplazamientos agrupados con bordes circulares definidos que se desplazan entre las coordenadas UTM Norte 1896750 y 1896800.

Para el área de estudio la presencia de valores negativos o bajos valores intercalados entre los intrusivos plantean zonas débiles generados por el emplazamiento de estos, pudiendo ser utilizados como canales de flujos e incluso socavando las unidades encajonadas.

Finalmente, para mejorar la interpretación y poder trazar un perfil (A-A') con el mapa de datos magnéticos residuales y conseguir un modelo; las capas y vectores se visualizan en la ilustración 34 que contiene capas de rasgos geológicos locales. El modelo se encuentra más adelante en la ilustración 40.

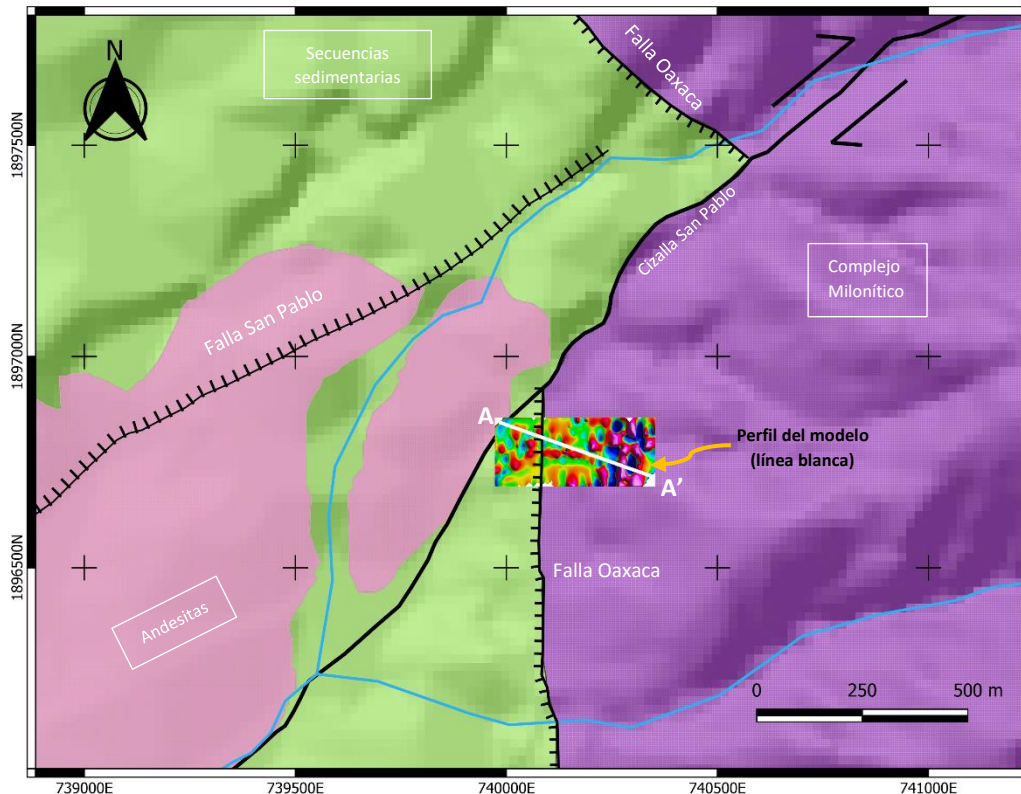


Ilustración 34. Mapa de anomalías residuales de la zona de estudio. Compilado en QGIS. Contenido propio.

De esta forma, aprecia visualmente que la anomalía magnética con valores negativos puede relacionarse con la presencia de la Falla Oaxaca; y cruza esta región como lo describen los estudios geofísicos previos. Se debe tomar en cuenta que las fallas son generalmente zonas o áreas y no estructuras unidimensionales.

Las observaciones se engloban en la presencia de fuentes magnéticas profundas o altamente ferromagnéticas someras que generan anomalías positivas en la sección Este del mapa, o incluso

Cartográficamente el lineamiento de la Falla Oaxaca cruza la zona de estudio en la coordenada UTM Este 740000.

Estimación de profundidades a partir del espectro radial de potencia

Cálculo de espectro de potencia para anomalía con reducción al polo.

La ilustración 35 se obtuvo a partir del cálculo del espectro de potencia a la anomalía reducida al polo, para de esta manera separar las señales en fuentes de interés. Los efectos regionales o de fondo se asocian a las frecuencias bajas, mientras que las fuentes someras o efectos locales en la anomalía son aportadas por frecuencias altas en la señal del espectro.

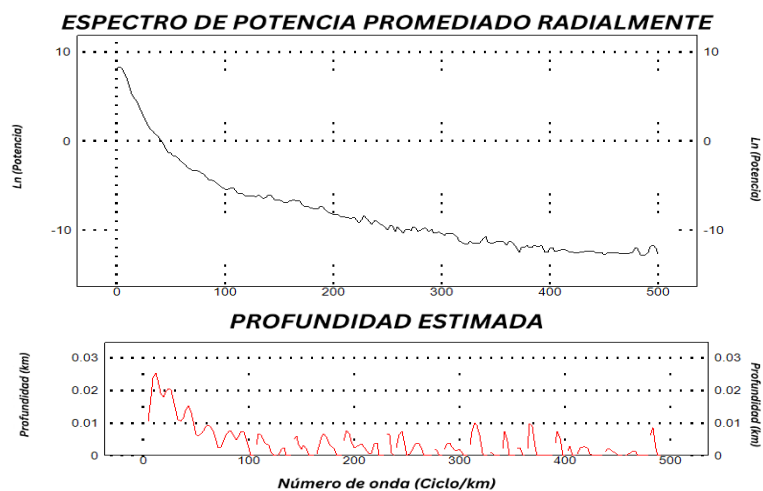


Ilustración 35. Gráfico del espectro de potencia generado en Oasis Montaj.



En la ilustración 36 se grafican los valores del logaritmo de potencia y el número de onda extraídos del procesamiento en Oasis Montaj. Se aprecian dos pendientes en la curva que proponen dos fuentes principales.

La primera hacer referencia a efectos regionales mientras que la segunda pendiente a efectos de tipo local. Para este trabajo son importantes los efectos de los cuerpos que son intrusiones, fallas y cavidades someras, nos interesa la pendiente de efectos locales. A través de una regresión lineal de los datos del espectro de potencia en función del número de onda, se obtuvieron los valores de pendiente (m), valor que se utiliza para calcular los promedios de profundidades. Utilizando la formula:  $h = m/4\pi$ .

| Fuente | m (pendiente) | Usando<br>$h = m/4\pi$ | Asociación a la respuesta                    |
|--------|---------------|------------------------|----------------------------------------------|
| 1      | -0.2097       | -164.69                | Basamento magnético                          |
| 2      | -0.0251       | -19.71                 | Promedio de profundidades de fuentes locales |

Tabla 6. Profundidades promedio calculadas por el método de Spector.

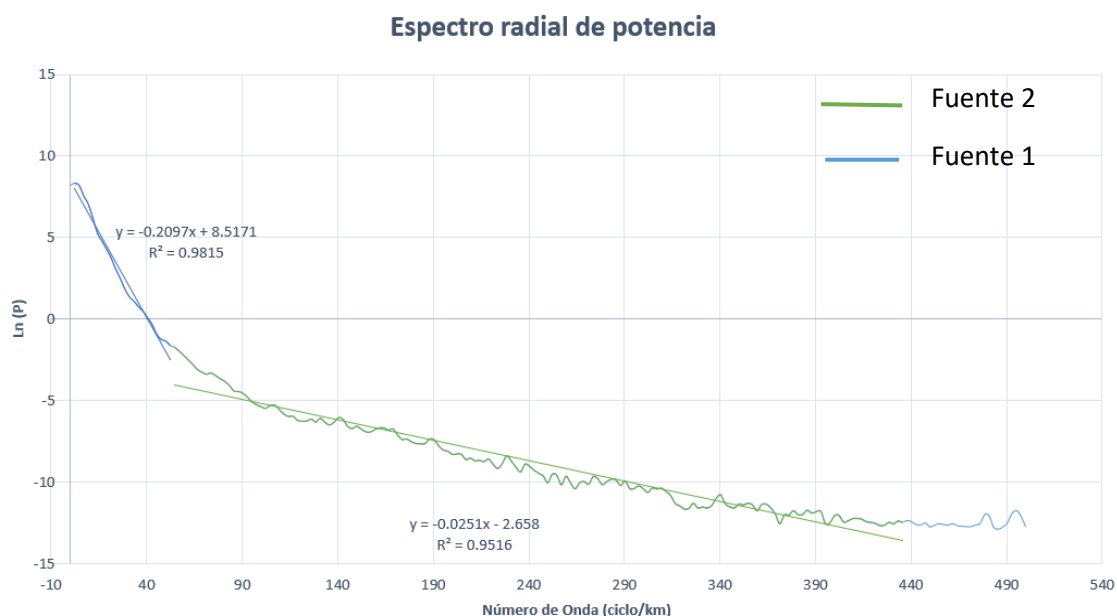


Ilustración 36. Gráfico elaborado para cálculo de pendientes de la línea de tendencia.

Profundidades de Wenner

De la base de datos creada para las *profundidades de Werner* se seleccionaron algunos datos más representativos de los 1200 calculados y se localizan sobre el mapa de la señal analítica, en la ilustración 37. De manera que la orientación y los valores de intensidad son los mismos que los de la ilustración 33.

La tabla 7, contiene los valores de media y moda para diques o contactos.

| <i>Diques</i>   | <i>Metros</i> | <i>Contactos</i> | <i>Metros</i> |
|-----------------|---------------|------------------|---------------|
| <i>Moda</i>     | <b>401.9</b>  | <i>Moda</i>      | <b>298.8</b>  |
| <i>Promedio</i> | <b>331.3</b>  | <i>Promedio</i>  | <b>299.7</b>  |

Tabla 7. Valores de moda y media, para las profundidades de diques y contactos geológicos.

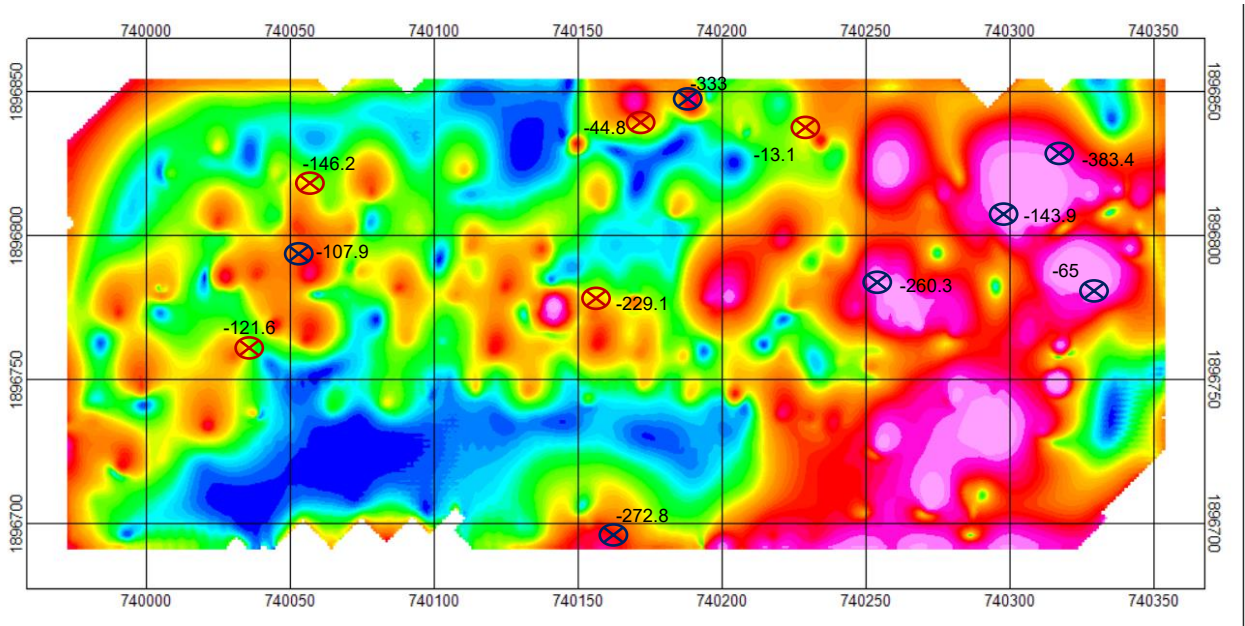


Ilustración 37. Ubicación de algunos diques y contactos calculados con *Werner depths* sobre el mapa de señal analítica. Marcas rojas: contactos. Marcas azules: diques.

Al sobreponer las posiciones de los diques y contactos sobre el mapa, se logra visualizar que coinciden en su mayoría con las anomalías, es decir, que las marcas azules de diques si se sitúan sobre las anomalías positivas con valores altos, que en el modelo matemático se puede asociar a la fuentes con presencia de minerales altamente ferromagnéticas.

Resultados de los sondeos eléctricos verticales

Las características esperadas de las rocas en cuanto a las propiedades eléctricas del subsuelo en general son coherentes porque responden a la distribución de las unidades rocosas y sus posibles espesores.

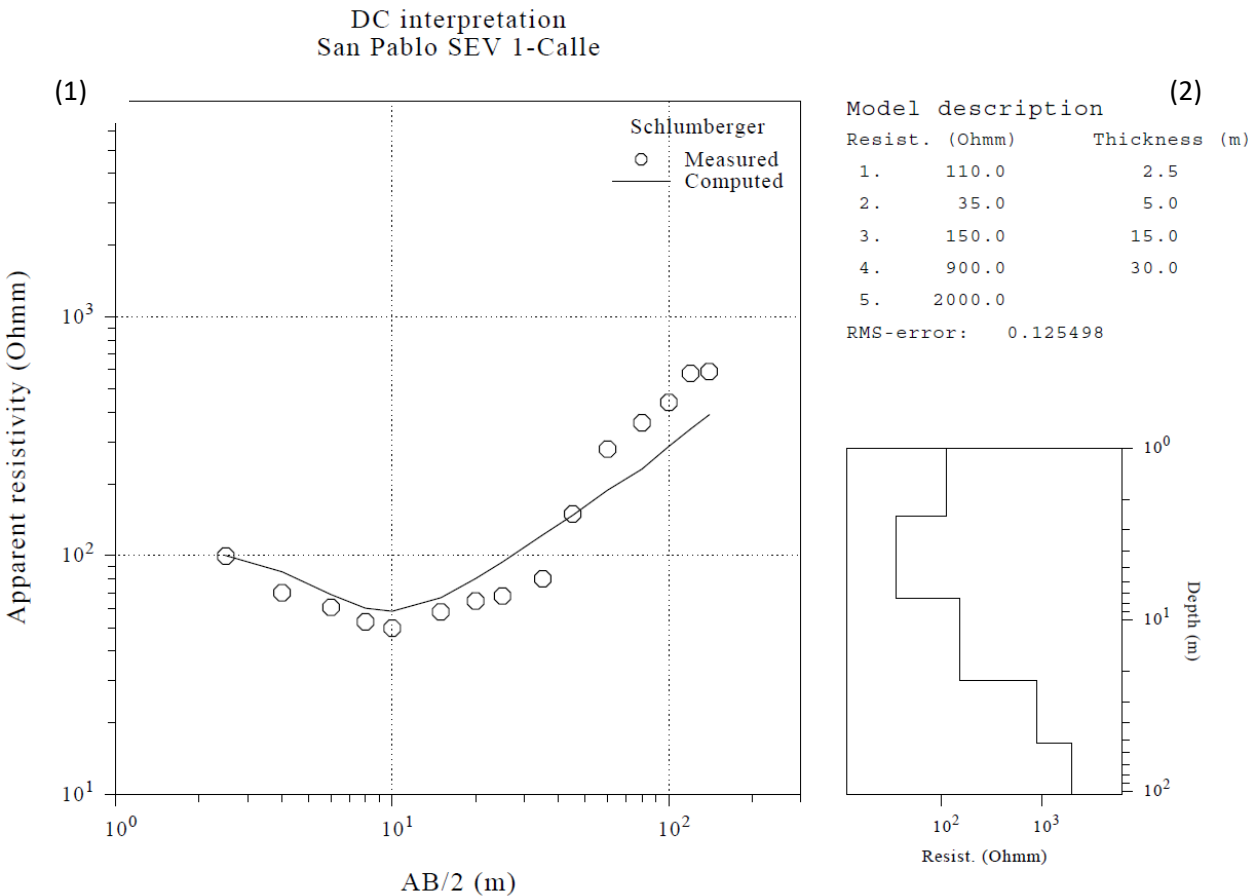


Ilustración 38. Curva de resistividad eléctrica para el SEV 1 (1). Modelo realizado con el software DCINV (2).

El modelo obtenido con los datos del primer sondeo discrepó de un error del 12% como se visualiza en la ilustración 38. Con lectura de datos a más de 50 metros de profundidad.

Si bien la tendencia de los datos es en aumento para las ultimas capas, donde se asume las lecturas son de roca metamórfica poco alterada; en esta sección con dificultad pudo acercarse la curva computada a la curva de datos ingresados. De esta manera, la interpretación del sondeo se respaldó con las observaciones de la geología de campo.

Cabe mencionar que este sondeo estuvo más retirado de los puntos de escurrimientos provenientes del suelo y no había manifestaciones superficiales de agua infiltrándose.

1. La primer capa se le asoció una resistividad de 110 ohms-m con un espesor de 2.5 metros, correspondiente a materiales pétreos de relleno existente en el recubrimiento del camino de terracería, gravas y sedimentos limosos duros que se observaron en campo. Esta primera capa superficial se encuentra en constante recubrimiento por depósito de sedimentos producto de erosión de la arenisca y milonita, que forman suelos con poca consolidación.

2. Para la segunda capa la resistividad disminuye a más de la mitad, con un espesor de 5 metros y una resistividad de 35 ohms-m. Este cambio se asocia a humedad por los flujos subterráneos que se hacen presentes en estas unidades rocosas. El agua en conjunto con las sales y minerales de óxidos que transporta aumentan la conductividad en la rocas, esta alteración se ve reflejada en las lecturas de resistividad bajas.

3. A partir de la tercera capa cerca de los 8 metros de profundidad, las resistividades llegan a 150 ohms-m; que se asocian a valores de rocas de arenisca con poca o nula humedad. De esta manera y por la geología conocida; esta capa corresponde a rocas areniscas de la Formación Oaxaca de composición arenisca-lutita con un espesor de 15 metros.

4. Para una cuarta capa se asociaron resistividades altas de 900 ohms-m con rocas metamórficas del Complejo Milonítico que comienzan a una profundidad aproximada de 25 metros y alcanzan un espesor de 30 metros. En estos datos se asume que corresponden a la roca sin alterar, arrojando lecturas propias de rocas poco conductivas como lo son las metamórficas.

5. Finalmente, se propone una quinta capa con resistividades en aumento que pudieran alcanzar valores arriba de 2000 ohms-m en profundidades en el orden de 50 metros, teniendo en cuenta la tendencia de los datos y la curva en general.

En el caso del sondeo 2 que se visualiza en la ilustración 39, las resistividades no rebasaron los 150 ohms-m. Esto se explica desde las condiciones del sitio observadas en campo, que se encuentra entre terrenos de cultivo y mayormente a su cercanía con las manifestaciones superficiales de los fluidos mineralizantes que se infiltran y retienen en las capas someras. De esta manera, alteran las capas del subsuelo y su respuesta eléctrica.

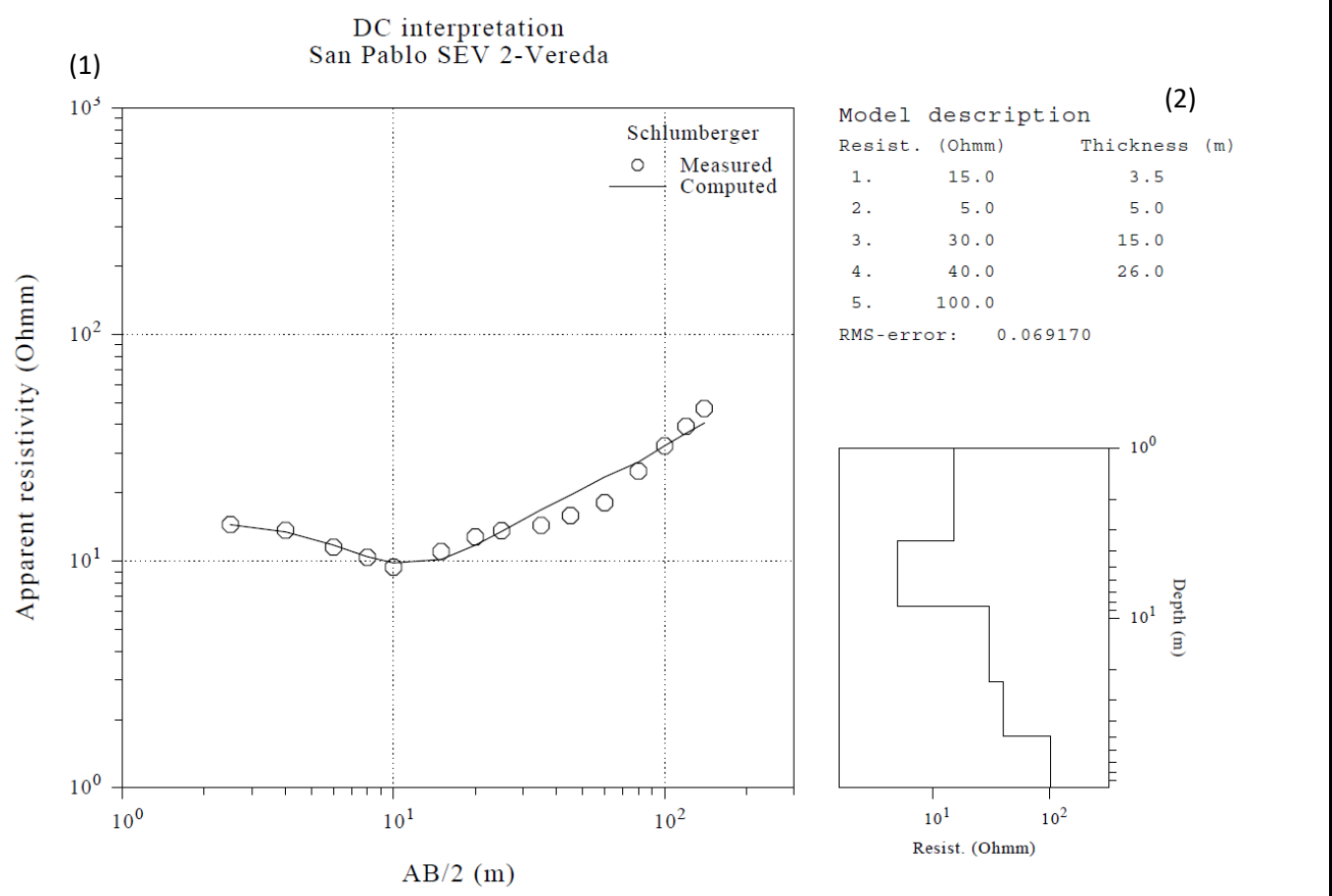


Ilustración 39. Curva de resistividad eléctrica para el SEV 2 (1). Modelo realizado con el software DCINV (2).

1. La primera capa se asocia una resistividad de 15 ohm-m con un espesor de 3.5 metros. Visualmente se aprecia materia orgánica en el primer metro desde la superficie, mezclado con limos y gravas de arenisca que en las partes bajas topográficamente la humedad satura el suelo de manera importante. De esta forma, la mezcla entre humus, sedimentos

duros, gravas y cantos de milonitas, en conjunto con los fluidos mineralizantes ricos en óxidos que humedecen la superficie dan como respuesta una resistividad baja.

2. Una segunda capa con espesor de 5 metros y una resistividad más baja, de 5 ohms-m. Se asocia a horizontes no consolidados saturados y alterados por los fluidos mineralizantes subterráneos que ascienden a través de la falla y se conducen a través de las cavidades y fracturas generadas por el flujo mismo de agua. Es en esta capa donde se interpreta se concentran y fluyen los pulsos de agua.

3. La tercera capa con valores de resistividad en 30 ohms-m con un espesor de 15 metros. Para este segmento del subsuelo se asocian materiales de la formación de arenisca-lutita, fuertemente alterados y socavados por los fluidos mineralizantes, pero sin una retención de humedad considerable al momento de la adquisición. Aunque para ser una capa que empieza alrededor de los 9 metros de profundidad, por las observaciones en campo de pozos noria cercanos, se trata de unidades alteradas; pues los rastros de depósitos y arrastre de los óxidos se hace visible en la geología del sitio.

4. La cuarta capa se asoció con un espesor de 26 metros y valores de resistividad de 40 ohms-m.

5. Una quinta capa propuesta se establece en 100 ohms-m, una curva con tendencia ascendente para los valores de resistividad, indicando que los siguientes corresponden a unidades de la formación sedimentaria menos alteradas.

La última capa en ambos sondeos, correspondiente a la profundidad máxima alcanzada por el sondeo o de espesor infinito, no refleja de manera precisa las propiedades de la roca más profunda, ya que el campo eléctrico puede verse atenuado por las capas superiores. En este caso, no representa los datos adquiridos sino un valor de resistividad ajustado a la tendencia de los datos.

Al analizar y comparar las dos curvas modeladas en conjunto con la distribución de los datos, se logra apreciar cierta similitud en su tendencia o comportamiento, asociadas a curvas tipo HK en modelos de 4 capas. Ambas comienzan con valores intermedios que disminuyen hasta una capa de valores mínimos, a partir de estos bajos resistivos asociados a humedades importantes o incluso puede tratarse de cavidades, comienza

un aumento en los valores que se prolonga hasta obtener resistividades de rocas sin alteración.

La principal diferencia entre las curvas de los sondeos 1 y 2 es el límite en los que se desplazan, como se mencionó al inicio de la descripción de estas. Las características de los sitios de prospección son distintos a pesar de la lejanía entre los SEV's.

El sondeo 2 a diferencia del sondeo 1 se encuentra precisamente en medio del área de afectación por los escurrimientos de los fluidos mineralizantes y, además en medio de los terrenos de cultivo; afectando directamente y de manera importante las respuestas geoelectricas de los materiales en el subsuelo que han estado en contacto constante o permanente con el agua, a diferencia de donde no existen un flujo perenne.

Modelado directo a partir de datos magnéticos de efecto local

El perfil A-A' que se trazó y se visualiza en la ilustración 34 tiene una longitud de 350 m. con estaciones cada 10 metros para el modelado directo utilizando los datos de elevación levantados (topografía) y los valores o malla de anomalía residual. Apoyado con los modelos de espesores obtenidos de cada sondeo eléctrico vertical y las secciones transversales del SGM que se pueden consultar en el anexo 4a.

Los valores de densidad y susceptibilidad magnética se tomaron de los resultados publicados por Belmonte-Jiménez (2005) para la región en uno de los perfiles geofísicos realizados que cruza el Valle de Etlá.

- Complejo Milonítico:  $2.67 \text{ g/cm}^3$  para la densidad.
  - ✓  $0.006 \text{ cgs}$  en la susceptibilidad magnética del cinturón milonítico.
- Formaciones sedimentarias:  $2.5 \text{ g/cm}^3$  para la densidad.
  - ✓  $0.00005 \text{ cgs}$  para susceptibilidad magnética para las unidades sedimentarias.

# Modelo directo de datos magnéticos residuales

Generated with GM-SYS

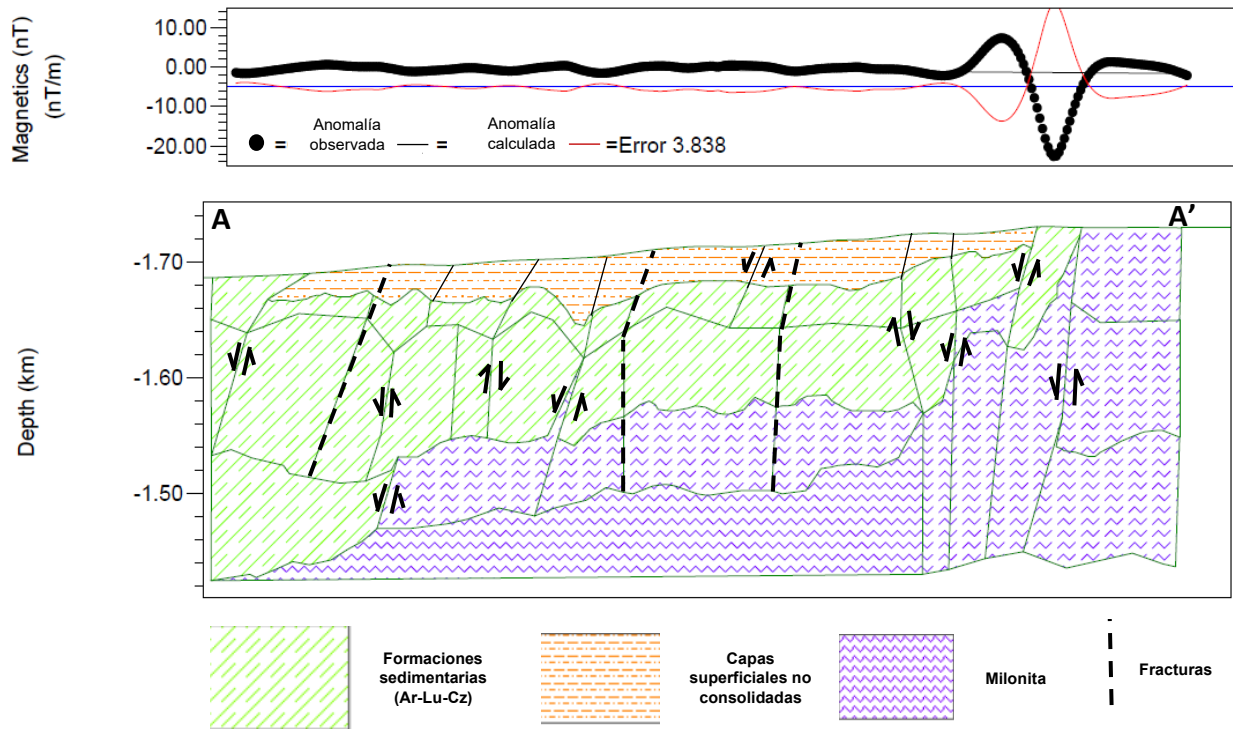


Ilustración 40. Modelo geológico-geofísico del perfil A-A' de la anomalía magnética residual.

La sección inferior del modelo representa una interpretación geológica basada en datos magnéticos residuales, como lo evidencia el panel superior, donde se observa la comparación entre la anomalía magnética observada (puntos negros) y la calculada (línea negra), con un error ajustado de 3.838% (curva roja). Esta baja discrepancia sugiere un buen ajuste entre el modelo geológico propuesto y la respuesta magnética observada, validando la confiabilidad del modelo. La composición heterogénea y la anisotropía mineralógica del Cinturón Milonítico que está compuesto al menos de 5 protolitos como las rocas graníticas, ultramáficas, ultrabásicas, metagabros y esquistos; genera incertidumbre en donde las anomalías son más intensas.



En el panel inferior, se identifican tres unidades geológicas principales: las capas superficiales no consolidadas que son las rocas altamente alteradas más someras, formaciones sedimentarias (Ar–Lu–Cz) y cuerpos de milonita. Las formaciones sedimentarias, indicadas por el sombreado verde, dominan la parte media del perfil, mientras que los cuerpos de milonita (en morado ondulado) se localizan en el sector más profundo, actuando posiblemente como unidades de baja permeabilidad que encauzan el flujo de fluidos hacia las zonas de fracturamiento.

La interpretación se respaldó con la geología de campo correlacionada a la anomalía magnética residual para localizar las fracturas y fallas (líneas negras segmentadas y continuas respectivamente), estas tienen un papel fundamental en la dinámica hidrogeológica del sistema. Su disposición, generalmente subvertical y con inclinación variable, las convierte en conductos preferenciales para el ascenso de aguas subterráneas mineralizadas.

Este sistema de fallas interconectadas permitiría la migración de fluidos desde zonas profundas, donde el agua podría calentarse y enriquecerse en minerales ferromagnéticos al interactuar principalmente con los minerales del cinturón de milonitas que es abundante en minerales máficos y ultramáficos; además de los minerales procedentes de los cuerpos extrusivos cercanos que se describen como andesitas. Siendo estas concentraciones en todo el sistema, las responsables de las anomalías magnéticas positivas intensas que se distribuyen en el mapa de anomalía residual.

Finalmente, las anomalías negativas intensas que se encuentran a través del perfil se asocia a la presencia de múltiples discontinuidades posiblemente saturadas (fallas normales, laterales) que sugiere un régimen tectónico extensional activo. Esta tectónica genera zonas de alta permeabilidad secundaria, lo cual explicaría la surgencia de aguas cargadas de minerales en superficie, fenómeno asociado a la formación de Las Salinas. Estos procesos son similares a los sistemas hidrotermales someros donde las fracturas controlan la emisión de aguas mineralizadas.

## 6. Capítulo 6. Conclusiones generales.

La estimación de la profundidad de las fuentes responsables de las anomalías magnéticas locales, obtenida mediante el espectro de potencia radial, arrojó una profundidad promedio de 19.7 metros para el techo de los prismas, lo que proporciona un rango para ubicar estructuras superficiales relevantes.

La aplicación de la señal analítica y de la derivada vertical a los datos magnéticos residuales contribuyó significativamente a la identificación de gradientes y bordes magnéticos asociados con fallas, fracturas, fisuras y zonas débiles que delimitan unidades litológicas con distintas respuestas magnéticas y, por tanto, diferentes composiciones mineralógicas, algunos sitios de estos mantienen flujos perennes.

Se identificó que las estructuras superficiales como cavidades y escurrimientos activos se manifiestan con picos de alta intensidad magnética en la derivada vertical, posiblemente relacionadas con concentraciones a profundidad de minerales ferromagnéticos como los óxidos con una susceptibilidad magnética alta los cuales pueden ser los responsables de anomalías positivas.

La fisuras de estructuras minerales y fracturas por donde el agua asciende, localizadas en zonas de debilidad estructural que atraviesan unidades sedimentarias y generan alteraciones en la unidad metamórfica de milonitas se asociaron a las respuestas magnéticas negativas de valores altos.

Las posibles intrusiones que se generan se pueden abordar desde la propuesta realizada por Ortega-Obregón et al. (2003), quien señala que la actividad de fallas secundarias pudo facilitar la intrusión y el reacomodo de cuerpos ígneos durante eventos volcánicos del Terciario.

El modelado de los datos adquiridos en la zona de estudio permitió conocer la disposición de los materiales litológicos directamente influenciados por la dinámica de la Falla de Oaxaca en el área.

Los efectos profundos de esta discontinuidad en el contacto geológico se confirma por el bajo magnético en -20 nT presente en el extremo derecho perfil. Los resultados obtenidos

fueron coherentes con la actividad tectónica regional e ígneo a de la zona, permitiendo analizar las anomalías magnéticas a través del modelado directo.

A partir del modelo se determinó que las unidades rocosas presentes están limitadas y modificadas por estructuras como fallas e intrusivos posiblemente de origen profundo, que se pudieron analizar en los datos obtenidos procesados. Esta configuración evidencia la complejidad geológica particular del sitio, relacionada con el arreglo morfotectónico previamente descrito.

Considerado la complejidad estructural del área, el análisis conjunto de la información geofísica obtenida y geológica disponible sugiere con ayuda del modelo conceptual creado; la relación de zonas de debilidad controladas por la Falla Oaxaca y su red de fallas secundarias que infiltra agua disolviendo las rocas sedimentarias y milonitas; con abundancia en carbonatos y minerales ultramáficos respectivamente; se intercambian y transportan especies geoquímicas que se depositan en superficie. Dando origen a las mineralizaciones.

Este modelo representa una base sólida inicial para futuras investigaciones geológicas y esfuerzos de exploración en la región.

## **Recomendaciones.**

A medida que la forma de aplicar la geofísica evoluciona y se mejora la eficiencia de las prospecciones en campo, es crucial desarrollar e implementar sistemas de monitoreo geofísico. En este caso a consideración del arreglo geológico local y con fines de generar modelos que permitan comprender el arreglo completo en la zona a lo largo de la Falla Oaxaca en lo que respecta a los límites con las urbes.

Integrar el análisis gravimétrico y otros enfoques de los métodos eléctricos como la polarización inducida, tomografías eléctricas en 3D; en perfiles con una extensión mayor en la región permitiría realizar modelos más precisos al aportar diferentes propiedades geofísicas.

Extender las campañas magnetométricas terrestres con perfiles extensos de hasta 2 kilómetros separados cada 200 metros con la misma dirección O-E con la finalidad de conservar resoluciones altas, abarcando las comunidades desde San Agustín Etla, hacia el sur pasando por Trinidad de Viguera e incluso segmentos del Cerro de Fortín atravesando diversas fallas y cizallas, donde se asume es el límite del Cinturón Milonítico. De esta manera, al expandir el área de adquisición de datos se pueden dividir y analizar por bloques la respuesta de anomalías magnéticas en la zona, y describir con detalle cómo se extienden los lineamientos magnéticos presentes.

Adicionalmente, los estudios de prospección sísmica pueden contribuir a identificar espesores de formaciones y definir geometrías de las estructuras que se encuentren presentes, la sísmica de refracción en 3D sería una metodología que contribuya a la comprensión del origen de las anomalías.

Los estudios hidrogeoquímicos son importantes para confirmar las especies minerales precisas que se transportan, depositan y se intercambian en el agua; por lo que deben ser tomados en cuenta para describir características de la calidad del agua subterránea.

## 7. Bibliografía y referencias

- Alaniz-Álvarez, S. A., & Nieto-Samaniego, Á. F. (1997). Representación gráfica de los dominios de ruptura y deslizamiento-aplicación a la falla de Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14, 26–37.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., & Ortega-Gutiérrez, F. (1994). Evolución estructural del complejo milonítico de la Sierra Juárez. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 147–156.
- Alken, P., Thébault, E., Beggan, C. D., Amit, H., Aubert, J., Baerenzung, J., Bondar, T. N., Brown, W. J., Califf, S., Chambodut, A., Chulliat, A., Cox, G. A., Finlay, C. C., Fournier, A., Gillet, N., Grayver, A., Hammer, M. D., Holschneider, M., Huder, L., ... Zhou, B. (2021). International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth, Planets and Space*, 73(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
- Ángeles-Moreno, E., Ortega-Gutiérrez, F., & Elías-Herrera, M. (2012). *Geological map of the western border of the Cuicateco Terrane, southern Mexico*. <https://doi.org/10.1130/2012.MCH102>
- Arzate-Flores, J. A., Campos Enriquez, J. O., Arango-Galván, C., & Corbo-Camargo, F. (2007). *Estructura de la zona de sutura entre los Terrenos Oaxaca y Juárez (Falla Oaxaca) a partir de sondeos magnetotélúricos*. <https://www.researchgate.net/publication/270821562>
- Arzate-Flores, J. A., Molina-Garza, R., Corbo-Camargo, F., & Márquez-Ramírez, V. (2016). Low angle contact between the Oaxaca and Juárez terranes deduced from magnetotelluric data. *Pure and Applied Geophysics*, 173(10–11), 3357–3371. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1295-y>
- Baranov, V., & Naudy, H. (1964). Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29, 67–79.

- Belmonte-Jiménez, S. I. (2005). *Caracterización geofísica del sistema hidrogeológico del Valle de Zaachila, Oaxaca y su relación con la geología tectónica regional*. [UNAM]. [https://repositorio.unam.mx/contenidos/caracterizacion-geofisica-del-sistema-hidrologico-del-valle-de-zaachila-oaxaca-y-su-relacion-con-la-geologia-tectoni-65911?c=BZ3LD3&d=false&q=\\*&i=2&v=1&t=search\\_0&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/caracterizacion-geofisica-del-sistema-hidrologico-del-valle-de-zaachila-oaxaca-y-su-relacion-con-la-geologia-tectoni-65911?c=BZ3LD3&d=false&q=*&i=2&v=1&t=search_0&as=0)
- Belmonte-Jiménez, S. I. (2010). *Estudio de la isoterma de Curie en una zona de Oaxaca. Modelado numérico de datos magnéticos*. <https://web.ciidiroaxaca.ipn.mx/sjimenez/sites/web.ciidiroaxaca.ipn.mx/sjimenez/files/pdf/Producto%20Sabatico%20SALVADOR%20BELMONTE%20J.pdf>
- Blakely J., R. (1996). *Potential theory in gravity and magnetics applications* (CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Ed.). Cambridge.
- Bucher, K., & Frey, M. (2002). Petrogenesis of Metamorphic Rocks. En *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04914-3>
- Campa, M. F., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico. En *Can. J. Earth Sci* (Vol. 20). [www.nrcresearchpress.com](http://www.nrcresearchpress.com)
- Campos-Enríquez, J. O., Belmonte-Jiménez, S. I., Keppie, J. D., Ortega-Gutiérrez, F., Arzate, J. A., Martínez-Silva, J., & Martínez-Serrano, R. G. (2010). Gravity and magnetic survey of the Oaxaca city region: Cenozoic horst-and-graben structure superimposed on the Oaxaca-Juarez terrane boundary, southern Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(3), 572–585. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.11.002>
- Campos-Enríquez, J. O., Corbo-Camargo, F., Arzate-Flores, J., Keppie, J. D., Arango-Galván, C., Unsworth, M., & Belmonte-Jiménez, S. I. (2013). The buried southern continuation of the Oaxaca-Juarez terrane boundary and Oaxaca Fault, southern Mexico: magnetotelluric constraints. *Journal of South American Earth Sciences*, 43, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.01.001>

- Cano, N., Camprubí, A., & González-Partida, E. (2022). Metallogeny of the state of Oaxaca, Mexico. *Journal of Maps*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2151384>
- Cantos Figuerola, J. (1973). *Tratado de geofísica aplicada* (2a ed.).
- Carfantan, J.-C. (1981). Evolución estructural del sureste de México; paleogeografía e historia tectónica de las zonas internas Mesozoicas. *Univ. Nal. Auton. Mexico, Inst. Geologia, Revista*, 5(2), 207–216. <https://rmcg.geociencias.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/1356>
- Centeno-García, E. (1988). Evolución estructural de la Falla Oaxaca durante el Cenozoico [UNAM]. En *UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO*. [https://repositorio.unam.mx/contenidos/evolucion-estructural-de-la-falla-de-oaxaca-durante-el-cenozoico-83884?c=7JoDZI&d=false&q=\\*&i=1&v=1&t=search\\_1&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/evolucion-estructural-de-la-falla-de-oaxaca-durante-el-cenozoico-83884?c=7JoDZI&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_1&as=0)
- CONAGUA. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valles Centrales (2025) estado de Oaxaca*.
- Consejo de Recursos Minerales. (2001). *Texto de guía magnética “Oaxaca” E14-9. Escala 1:250,000*. [https://www.sgm.gob.mx/pdfs/textos\\_guia/99\\_E14-9\\_GF\\_INF.pdf](https://www.sgm.gob.mx/pdfs/textos_guia/99_E14-9_GF_INF.pdf)
- Deng, L. P., Liu, Y. C., Gu, X. F., Groppo, C., & Rolfo, F. (2018). Partial melting of ultrahigh-pressure metamorphic rocks at convergent continental margins: Evidences, melt compositions and physical effects. *Geoscience Frontiers*, 9(4), 1229–1242. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.08.002>
- Espejo-Bautista, G., Ortega-Gutiérrez, F., Solari, L. A., Maldonado, R., & Valencia-Morales, Y. T. (2022). The Sierra de Juárez Complex: a new Gondwanan Neoproterozoic-early Palaeozoic metamorphic terrane in southern Mexico. *International Geology Review*, 64(5), 631–653. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1870172>
- Espejo-Bautista, G., Solari, L. A., Ortega-Gutiérrez, F., & Maldonado, R. (2020). *El complejo milonítico Sierra de Juárez: una nueva línea de evidencia sobre la*

- Espejo-Bautista, G., Solari, L., Maldonado, R., & Ramírez-Calderón, M. (2023). *Silurian to Cretaceous geological evolution of southern Mexico and its connection to the assembly and break-up of Western Equatorial Pangaea: geochronological constraints from the northern Sierra de Juárez Complex.* <https://doi.org/10.6084/m9>
- Espinoza Ortiz, M. (2024). *Evaluación espacio-temporal del acuífero del valle de Guasave, Sinaloa y su impacto al territorio geográfico.* IPN.
- Everett, M. E. (2013). *Near-surface applied geophysics* (Cambridge University).
- Flores-Márquez, E. L., Chávez, R. E., Martínez-Serrano, R. G., Herrera-Barrientos, J., Tejero-Andrade, A., & Belmonte, S. (2001). Geophysical characterization of the Etna Valley aquifer, Oaxaca, Mexico. *Geofísica Internacional*, 4(4), 245–257. <http://revistagi.geofisica.unam.mx/index.php/RGI/article/view/739/717>
- Florez-Amaya, S. L., Abdullin, F., Bedoya, A., Maldonado, R., Milián De La Cruz, R. E., Solari, L., Solé, J., & Ortega-Obregón, C. (2023, febrero 23). Detecting the Laramide event in southern Mexico by means of apatite fission-track thermochronology. *Geological Magazine*, 160(2), 322–333. <https://doi.org/10.1017/S0016756822000929>
- Geosoft Inc. (2015). *MAGMAP Filtering How-To Guide Defining and Applying Filters and Inverse FFT in MAGMAP.* [www.geosoft.com](http://www.geosoft.com)
- Grauch, V. J. S., Drenth, B. J., & Kimball, S. M. (2009). *High-Resolution Aeromagnetic Survey To Image Shallow Faults, Poncha Springs and Vicinity, Chaffee County, Colorado.* <http://www.usgs.gov/pubprod>
- Hinze, W. J., von Frese, R. R. B., & Saad, A. H. (2012). *Gravity and magnetic exploration. Principles, practices and applications.* (Cambridge University Press, Ed.).



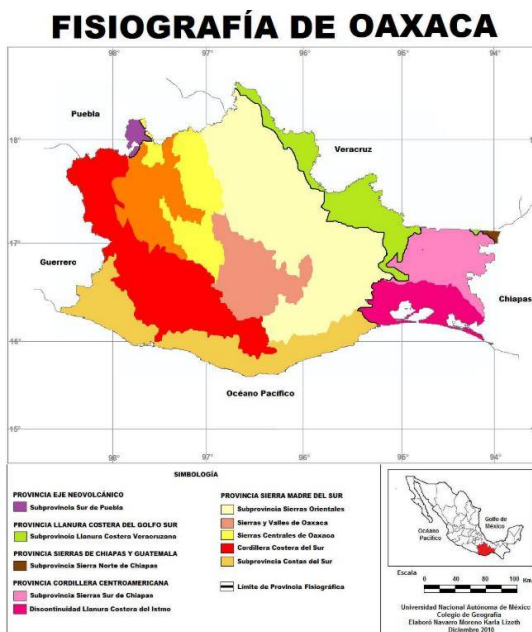
- Hinze, W. J., Von Frese, R., & Saad, A. H. (2013). *Oasis Montaj tutorial for gravity and magnetic exploration: principles, practices, and applications*. Cambridge University Press.
- INEGI. (2005). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Oaxaca de Juárez, Oaxaca*.  
[https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/20/20034.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/20/20034.pdf)
- INEGI. (2008). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Oaxaca de Juárez, Oaxaca Clave geoestadística 20067*.
- Iris Instruments. (2003). *Resistivity sounding: step-by-step operation of SYSCAL resistivitymeters*. [https://www.iris-instruments.com/Pdf\\_file/Syscal\\_pro.pdf](https://www.iris-instruments.com/Pdf_file/Syscal_pro.pdf)
- Isunza Manrique, I. (2017). *Anomalías magnéticas asociadas con intrusivos ígneos alejados del rift de la Cuenca de Guaymas, Golfo de California*. UNAM.
- Keppie, J. D. (2004). Terranes of Mexico revisited: a 1.3 billion year odyssey. *International Geology Review*, 46, 765–794. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.9.765>
- Keppie, J. D., Murphy, J. B., Nance, R. D., & Dostal, J. (2011, enero 1). Mesoproterozoic Oaxaquia-type basement in peri-Gondwanan terranes of Mexico, the Appalachians, and Europe: TDM age constraints on extent and significance. *International Geology Review*, 54(3), 313–324. <https://doi.org/10.1080/00206814.2010.543783>
- Keppie, J. D., & Ortega-Gutiérrez, F. (1995). Provenance of Mexican Terranes: isotopic constraints. *International Geology Review*, 37(9), 813–824. <https://doi.org/10.1080/00206819509465428>
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics* (Second Edition). Cambridge.
- Milsom, J. (1996). *Field geophysics* (Third edition).
- Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3). <http://library.seg.org/>

- Nabighian, M. N. (1984). Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. *Geophysics*, 49(6). <http://library.seg.org/>
- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D., & Ruder, M. E. (2005). The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6). <https://doi.org/10.1190/1.2133784>
- Navarro Moreno, K. L. (2011). Análisis fisiográfico del estado de Oaxaca: base de la amenaza sísmica [UNAM]. En *UNAM* (Número Tesis). <https://repositorio.unam.mx/contenidos/204110>
- Ndlovu., T., R. T., M., & P., M. (2015). Analytic Signal and Euler Depth Interpretation of Magnetic Anomalies: Applicability to the Beatrice Greenstone Belt. *Journal of Geography and Geology*, 7(4), 108. <https://doi.org/10.5539/jgg.v7n4p108>
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Ortega-Gutiérrez, F. (1995). Estructura interna de la falla de Oaxaca (México) e influencia de las anisotropías litológicas durante su actividad Cenozoica. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 12, 1–8.
- Orellana, Ernesto. (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua* (Segunda Edición). Paraninfo.
- Ortega-Gutiérrez, F. (1981a). *La evolución tectónica premisisípica del sur de México*. 5, 140–157. <https://www.researchgate.net/publication/28142450>
- Ortega-Gutiérrez, F. (1981b). Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance. *Geof. Int*, 20(3), 177–202. <http://revistagi.geofisica.unam.mx/index.php/RGI/article/view/85>
- Ortega-Obregón, C., Keppie, J. D., Solari, L. A., Ortega-Gutiérrez, F., Dostal, J., Lopez, R., Ortega-Rivera, A., & Lee, J. W. K. (2003). Geochronology and geochemistry of the -917 Ma, calc-alkaline etla granitoid pluton (Oaxaca, southern Mexico): evidence of post-grenvillian subduction along the northern margin of Amazonia. *International Geology Review*, 45(7), 596–610. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.45.7.596>

- Reynolds, J. M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*.  
<https://engineering.tiu.edu.iq/petromining/wp-content/uploads/2019/04/an-introduction-to-applied-and-environmental-geophysics-j.m-reynolds.pdf>
- Roy, K. K. (2019). *Potential theory in applied geophysics* (Springer Berlin Heidelberg, Ed.). Springer. <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-potential-theory-applied-geophysics.pdf>
- Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, Fernando., & Speed, R. C. (1993). *Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico*. Geological Society of America.
- Servicio Geológico Mexicano. (2000a). *Carta geológica-minera Oaxaca E19-9. Oaxaca y Puebla. 1:250 000*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2000b). *Carta geoquímica por Fósforo Oaxaca de Juárez E14-D47, Oaxaca*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2007a). *Carta geoquímica por Arsénico Oaxaca de Juárez E14-D47, Oaxaca*. <https://doi.org/10.4>
- Servicio Geológico Mexicano. (2007b). *Carta geoquímica por Bario Oaxaca de Juárez E14-D47, Oaxaca*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2007c). *Carta geoquímica por Cadmio Oaxaca de Juárez E14-D47, Oaxaca*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2007d). *Carta geoquímica por Cobre Oaxaca de Juárez E14-D47, Oaxaca*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2007e). *Carta geoquímica por Plomo Oaxaca de Juárez E14-D47, Oaxaca*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2007f). *Carta geoquímica por Zinc Oaxaca de Juárez E14-D47, Oaxaca*.
- SGM. (2008). *Carta geológica-minera Oaxaca de Juárez E14-D47. 1:50 000*.
- SGM. (2009). *Carta geológico-minera. Estado de Oaxaca. 1:500 000*.

- Spector, A., & Grant, F. S. (1970, abril). Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35, 293–302.
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. K. (2004). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. (Octava edición). Pearson-Prentice-Hall.
- V. Baranov, & H. Naudy. (1964). Numerical Calculation of the Formula of Reduction to the Magnetic-Pole. *Geophysics*, 29, 67–79.
- Velázquez-García, L. G. (2021). *Análisis espectral del campo magnético y gravimétrico para la estimación de profundidades a partir del espectro radial y la deconvolución de Euler*. [UNAM].  
<https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000813646/3/0813646.pdf>

## 8. Anexos.



Anexo 1. Provincias fisiográficas en el estado de Oaxaca. Tomado y modificado de (Navarro Moreno Karla Lizeth, 2011).

| COORDINACIÓN GENERAL DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL |                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
|----------------------------------------------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| NORMALES CLIMATOLÓGICAS 1991-2020                        |                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
| ESTADO :                                                 | OAXACA         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
| ESTACIÓN :                                               | OAXACA         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
| CLAVE :                                                  | 20079          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
| LATITUD :                                                | 17.88385556 °  |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
| LONGITUD :                                               | -96.70972222 ° |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
| ALTURA :                                                 | 1594 MSNM      |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
| <b>TEMPERATURA MÁXIMA</b>                                |                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
| MESES                                                    | ENE            | FEB     | MAR     | ABR     | MAY     | JUN     | JUL     | AGO     | SEP     | OCT     | NOV     | DIC     | ANUAL |
| NORMAL                                                   | 28.9           | 31.1    | 33.3    | 34.9    | 33.8    | 30.9    | 28.1    | 26.1    | 25.1    | 25.3    | 25      | 28.9    | 30.8  |
| MÁXIMA MENSUAL                                           | 31.2           | 33.4    | 36      | 38.4    | 39.5    | 36.2    | 32.4    | 31.3    | 32      | 31.3    | 31.5    | 30.9    |       |
| AÑO DE MÁXIMA                                            | 1995           | 1995    | 1995    | 1998    | 1998    | 1998    | 1997    | 1997    | 1996    | 1994    | 1994    | 1994    |       |
| MÁXIMA DIARIA                                            | 35.5           | 37      | 40.5    | 41.6    | 43      | 40      | 36.7    | 36.5    | 35      | 35.5    | 34.6    | 34      |       |
| FECHA MÁX DIARIA                                         | 22/2010        | 13/1995 | 23/1995 | 16/1998 | 06/1998 | 01/1998 | 04/1998 | 12/1998 | 23/1998 | 23/1995 | 28/1994 | 22/1997 |       |
| AÑOS CON DATOS                                           | 28             | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 27      | 27      | 26      |       |
| <b>TEMPERATURA MÍNIMA</b>                                |                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
| MESES                                                    | ENE            | FEB     | MAR     | ABR     | MAY     | JUN     | JUL     | AGO     | SEP     | OCT     | NOV     | DIC     | ANUAL |
| NORMAL                                                   | 10.3           | 11.6    | 13.6    | 15.8    | 16.7    | 16.7    | 15.9    | 15.9    | 16.1    | 14.4    | 12.1    | 10.9    | 14.2  |
| MÍNIMA MENSUAL                                           | 7.8            | 9.3     | 11.4    | 12.8    | 15      | 15.1    | 13.9    | 14.2    | 14.5    | 11.1    | 9.6     | 7       |       |
| AÑO DE MÍNIMA                                            | 1996           | 1998    | 2009    | 2012    | 2012    | 2012    | 2012    | 2014    | 2012    | 2010    | 2008    | 2010    |       |
| MÍNIMA DIARIA                                            | 1              | 4.5     | 3.6     | 8.5     | 11.5    | 11      | 11.5    | 12      | 11      | 5       | 3.5     | 2.5     |       |
| FECHA MÍN DIARIA                                         | 03/1999        | 06/2009 | 03/2013 | 02/1991 | 20/2008 | 10/2000 | 27/2013 | 22/1994 | 29/2010 | 24/1999 | 06/2010 | 10/2010 |       |
| AÑOS CON DATOS                                           | 28             | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 27      | 27      | 26      |       |
| <b>TEMPERATURA MEDIA</b>                                 |                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
| MESES                                                    | ENE            | FEB     | MAR     | ABR     | MAY     | JUN     | JUL     | AGO     | SEP     | OCT     | NOV     | DIC     | ANUAL |
| NORMAL                                                   | 19.6           | 21.4    | 23.5    | 25.4    | 25.3    | 23.7    | 23      | 23      | 22.6    | 21.9    | 20.6    | 19.9    | 22.5  |
| AÑOS CON DATOS                                           | 28             | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 27      | 27      | 26      |       |
| <b>PRECIPITACIÓN</b>                                     |                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |
| MESES                                                    | ENE            | FEB     | MAR     | ABR     | MAY     | JUN     | JUL     | AGO     | SEP     | OCT     | NOV     | DIC     | ANUAL |
| NORMAL                                                   | 2.4            | 4.6     | 17.6    | 47.3    | 97.9    | 188.3   | 118.6   | 131.8   | 163.6   | 63.8    | 9.2     | 9.3     | 85.4  |
| MÁXIMA MENSUAL                                           | 22.6           | 49.7    | 69.4    | 149.6   | 236.5   | 549.8   | 246.7   | 340.5   | 409.3   | 216.4   | 68.7    | 152.6   |       |
| AÑO DE MÁXIMA                                            | 1992           | 2014    | 1996    | 2013    | 2005    | 2017    | 2010    | 2012    | 2013    | 2005    | 1998    | 2019    |       |
| MÁXIMA DIARIA                                            | 7.5            | 28.5    | 65.7    | 81      | 102.5   | 93.2    | 53      | 68.5    | 88.6    | 117     | 58.5    | 42.2    |       |
| FECHA MÁX DIARIA                                         | 31/1992        | 28/2014 | 31/1996 | 23/2013 | 17/2005 | 27/2017 | 09/1998 | 25/2012 | 19/2010 | 04/2005 | 03/1998 | 22/2019 |       |
| AÑOS CON DATOS                                           | 28             | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 28      | 27      | 27      | 26      |       |

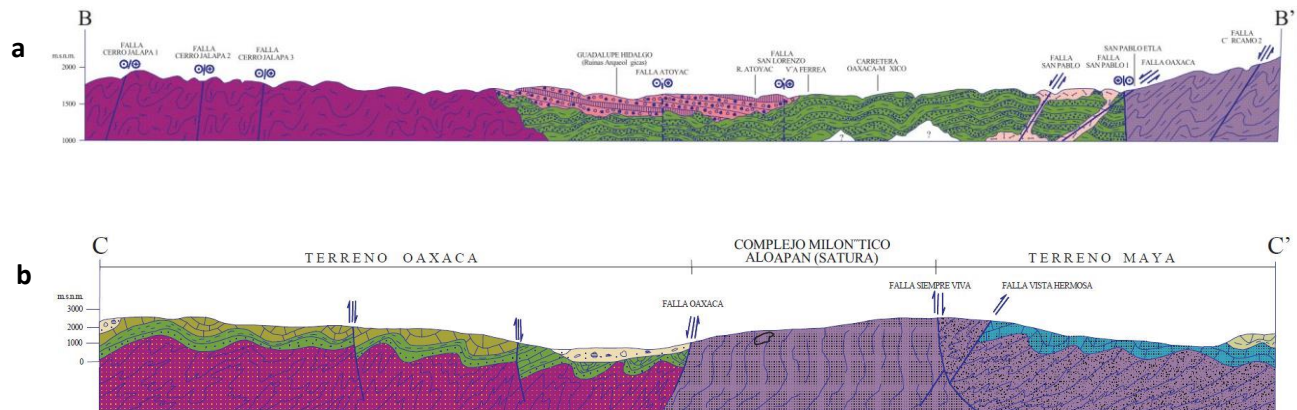
Anexo 2. Datos obtenidos del portal de CONAGUA.

[https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales\\_Climatologicas/Normales9120/oax/nor9120\\_20079.txt](https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Normales9120/oax/nor9120_20079.txt). Modificado en mayo de 2024.

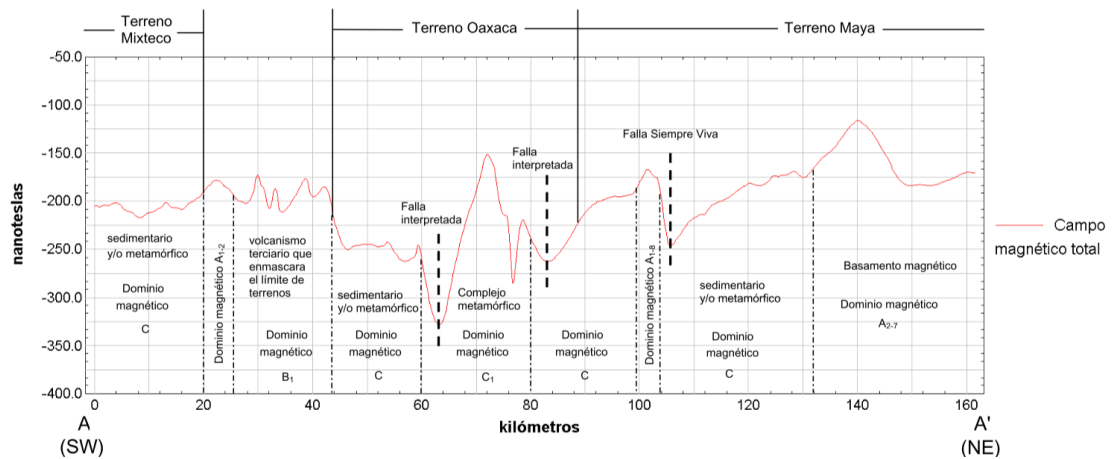
### ÍNDICES DEL CAUSE PRINCIPAL

| Propiedad                     | Valor                    |
|-------------------------------|--------------------------|
| Elevación Máxima              | 2565 m                   |
| Elevación media               | 2062 m                   |
| Elevación mínima              | 1559 m                   |
| Longitud                      | 8680 m                   |
| Pendiente media               | 11.5898 %                |
| Tiempo de concentración       | 45.22 min                |
| Área drenada                  | 18.86 km <sup>2</sup>    |
| Periodo de retorno            | 30 años                  |
| Coefficiente de escurrimiento | 0.5                      |
| Lluvia                        | 50 mm                    |
| Intensidad de lluvia          | 66.67 mm/h               |
| CAUDAL PICO O MÁXIMO          | 174.64 m <sup>3</sup> /s |

Anexo 3. Índices de cause simulado para la subcuenca de San Pablo en el portal SIATL del INEGI.



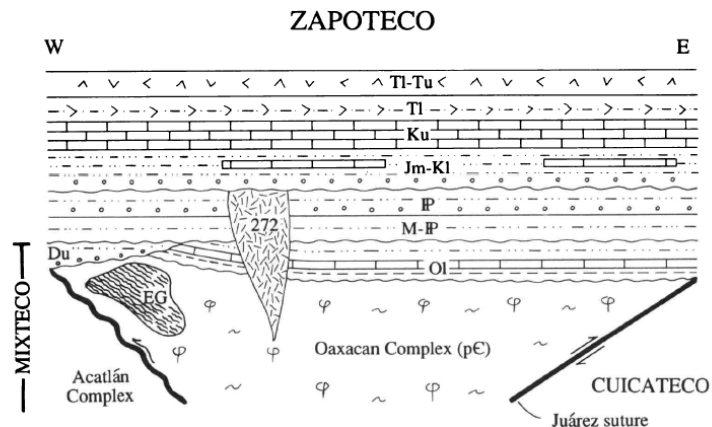
Anexo 4. a) Modificado de la Sección B de la carta geológica minera E14-D47. 1:50,000. b) Modificado de la Sección C de la carta geológica minera E14-D47. 1: 50,000 del SGM.



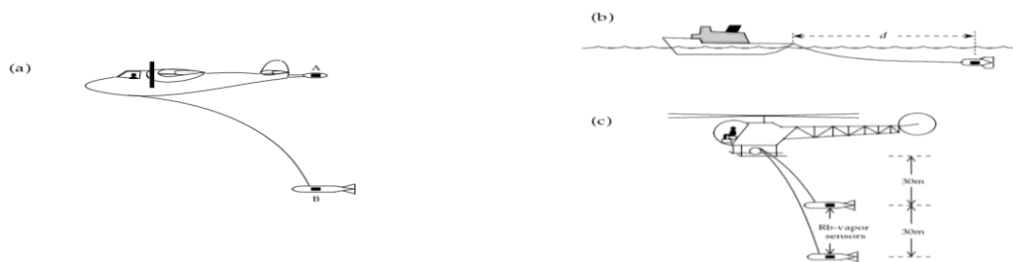
Anexo 5. Perfil magnetométrico interpretado de la sección A-A' modificado de (Consejo de Recursos Minerales. Alam Hernández, 2001).

| Mineral or rock type | Susceptibility*   |                 |                              |
|----------------------|-------------------|-----------------|------------------------------|
| <b>Sedimentary</b>   |                   | <b>Minerals</b> |                              |
| Dolomite (pure)      | - 12.5 to + 44    | Ice (d)         | - 9                          |
| Dolomite (impure)    | 20 000            | Rocksalt (d)    | - 10                         |
| Limestone            | 10 to 25 000      | Gypsum (d)      | - 13                         |
| Sandstone            | 0 to 21 000       | Quartz (d)      | - 15                         |
| Shales               | 60 to 18 600      | Graphite (d)    | - 80 to - 200                |
|                      |                   | Chalcopyrite    | 400                          |
|                      |                   | Pyrite (o)      | 50 to 5000                   |
|                      |                   | Hematite (o)    | 420 to 38 000                |
|                      |                   | Pyrrhotite (o)  | 1250 to $6.3 \times 10^6$    |
|                      |                   | Ilmenite (o)    | 314 000 to $3.8 \times 10^6$ |
|                      |                   | Magnetite (o)   | 70 000 to $2 \times 10^7$    |
| <b>Metamorphic</b>   |                   | <b>Minerals</b> |                              |
| Schist               | 315 to 3000       | Ice (d)         | - 9                          |
| Slate                | 0 to 38 000       | Rocksalt (d)    | - 10                         |
| Gneiss               | 125 to 25 000     | Gypsum (d)      | - 13                         |
| Serpentinite         | 3100 to 75 000    | Quartz (d)      | - 15                         |
|                      |                   | Graphite (d)    | - 80 to - 200                |
| <b>Igneous</b>       |                   | Chalcopyrite    | 400                          |
| Granite              | 10 to 65          | Pyrite (o)      | 50 to 5000                   |
| Granite (m)          | 20 to 50 000      | Hematite (o)    | 420 to 38 000                |
| Rhyolite             | 250 to 37 700     | Pyrrhotite (o)  | 1250 to $6.3 \times 10^6$    |
| Pegmatite            | 3000 to 75 000    | Ilmenite (o)    | 314 000 to $3.8 \times 10^6$ |
| Gabbro               | 800 to 76 000     | Magnetite (o)   | 70 000 to $2 \times 10^7$    |
| Basalts              | 500 to 182 000    |                 |                              |
| Oceanic basalts      | 300 to 36 000     |                 |                              |
| Peridotite           | 95 500 to 196 000 |                 |                              |

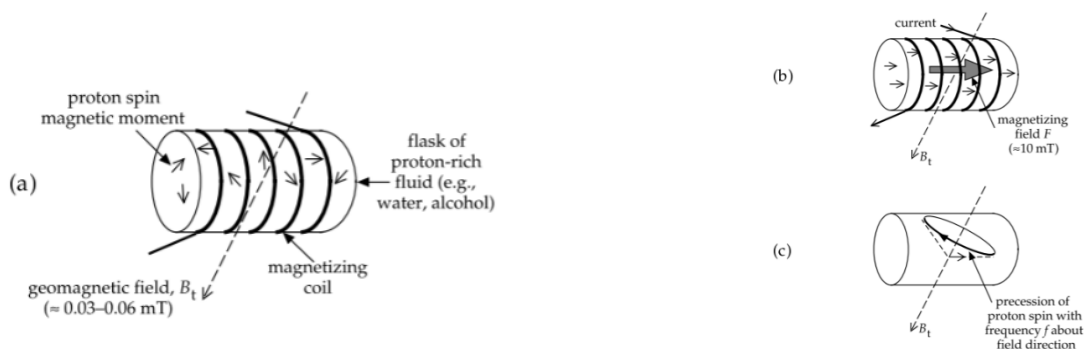
Anexo 6. Susceptibilidades magnéticas de rocas y minerales (unidades en SI). Modificado de (John M. Reynolds, 1997).



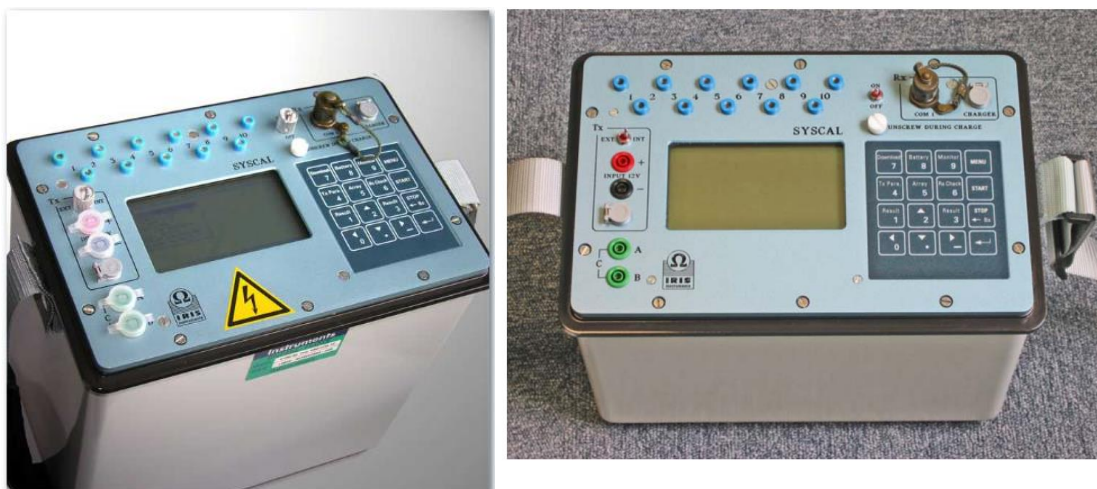
Anexo 7. Sección tectonoestratigráfica esquemática del Terreno Zapoteco. Modificado de (Sedlock et al., 1993).



Anexo 7.1. En el levantamiento magnético aéreo, el magnetómetro puede estar montado de manera fija en el avión, en el extremo de un brazo (A), o ser remolcado en una carcasa aerodinámica detrás del avión (B). b) En estudios marinos, el magnetómetro debe ser remolcado a una distancia  $d$  detrás del barco para evitar la interferencia de su campo magnético. c) Un par de magnetómetros sensibles en el mismo plano vertical actúa como un gradiómetro magnético.



Anexo 8. Esquema de un magnetómetro de precesión de protones.



Anexo 9. Recorte de fotografía del equipo Syscal Pro, propiedad de Iris Instruments. Tomado y consultado de <https://www.iris-instruments.com/syscal-pro.html>. El 30/05/2024.



| Punto | Perfil | UTM X  | UTM Y   | UTM Z | CMT (L1) | CMT (L2) | CMT (L3) | Lectura promedio |
|-------|--------|--------|---------|-------|----------|----------|----------|------------------|
| 1     | 1      | 740204 | 1896744 | 1712  | 38389.7  | 38389.6  | 38390.1  | 38389.8          |
| 2     | 1      | 740188 | 1896743 | 1711  | 38390.1  | 38390.8  | 38390.7  | 38390.5333       |
| 3     | 1      | 740172 | 1896747 | 1710  | 38393.4  | 38392.6  | 38392.5  | 38392.83333      |
| 4     | 1      | 740153 | 1896743 | 1708  | 38395    | 38395.3  | 38395.3  | 38395.2          |
| 5     | 1      | 740132 | 1896745 | 1707  | 38395.1  | 38394.3  | 38394.9  | 38394.76667      |
| 6     | 1      | 740114 | 1896746 | 1700  | 38396.4  | 38396    | 38396    | 38396.13333      |
| 7     | 1      | 740098 | 1896744 | 1697  | 38396    | 38396.9  | 38396.8  | 38396.56667      |
| 8     | 1      | 740083 | 1896741 | 1692  | 38398.1  | 38398.8  | 38398.6  | 38398.5          |
| 9     | 1      | 740064 | 1896739 | 1689  | 38400    | 38410    | 38404.9  | 38404.96667      |
| 10    | 1      | 740043 | 1896738 | 1684  | 38406.6  | 38405.5  | 38405.2  | 38405.76667      |
| 11    | 1      | 740037 | 1896737 | 1677  | 38407.2  | 38406.8  | 38406.5  | 38406.83333      |
| 12    | 1      | 740021 | 1896733 | 1676  | 38410.9  | 38410.9  | 38409    | 38410.26667      |
| 13    | 1      | 740004 | 1896721 | 1671  | 38399.1  | 38399.7  | 38399.7  | 38399.5          |
| 14    | 1      | 739991 | 1896719 | 1668  | 38396.2  | 38399.6  | 38399.3  | 38398.36667      |
| 15    | 2      | 739978 | 1896722 | 1665  | 38409.5  | 38408.8  | 38408.3  | 38408.86667      |
| 16    | 2      | 739973 | 1896733 | 1662  | 38403.3  | 38404.1  | 38404    | 38403.8          |
| 17    | 2      | 739981 | 1896734 | 1664  | 38403    | 38402    | 38402    | 38402.33333      |
| 18    | 2      | 739998 | 1896746 | 1666  | 38398    | 38398    | 38397.8  | 38397.93333      |
| 19    | 2      | 740020 | 1896757 | 1668  | 38402    | 38399.8  | 38401.1  | 38400.96667      |
| 20    | 2      | 740030 | 1896757 | 1672  | 38399.5  | 38399.2  | 38399.7  | 38399.46667      |
| 21    | 2      | 740044 | 1896768 | 1675  | 38399.9  | 38400.3  | 38401.1  | 38400.43333      |
| 22    | 2      | 740055 | 1896763 | 1676  | 38402.5  | 38403    | 38405    | 38403.5          |
| 23    | 2      | 740069 | 1896764 | 1678  | 38397.9  | 38398.7  | 38398.6  | 38398.4          |
| 24    | 2      | 740090 | 1896763 | 1680  | 38394.9  | 38394.3  | 38395    | 38394.73333      |
| 25    | 2      | 740103 | 1896763 | 1684  | 38393.8  | 38392.9  | 38393    | 38393.23333      |
| 26    | 2      | 740120 | 1896759 | 1692  | 38395.1  | 38395.5  | 38395.3  | 38395.3          |
| 27    | 2      | 740139 | 1896762 | 1696  | 38390.8  | 38391.5  | 38391.2  | 38391.16667      |
| 28    | 2      | 740156 | 1896761 | 1699  | 38391.8  | 38391.8  | 38391.4  | 38391.66667      |
| 29    | 2      | 740171 | 1896759 | 1700  | 38388.1  | 38388.1  | 38388.3  | 38388.16667      |
| 30    | 2      | 740186 | 1896757 | 1705  | 38384.3  | 38385.2  | 38385.2  | 38384.9          |
| 31    | 2      | 740230 | 1896735 | 1706  | 38377.4  | 38376.9  | 38376.5  | 38376.93333      |
| 32    | 2      | 740220 | 1896737 | 1710  | 38374.6  | 38374.9  | 38374.4  | 38374.63333      |
| 33    | 2      | 740239 | 1896734 | 1713  | 38374.8  | 38375.2  | 38374.8  | 38374.93333      |
| 34    | 2      | 740255 | 1896726 | 1715  | 38390.3  | 38390.9  | 38392.5  | 38391.23333      |
| 35    | 2      | 740277 | 1896723 | 1720  | 38432    | 38431.8  | 38432.3  | 38432.03333      |
| 36    | 2      | 740292 | 1896726 | 1726  | 38237.5  | 38437.7  | 38437.4  | 38370.86667      |
| 37    | 2      | 740311 | 1896731 | 1730  | 38423.5  | 38420.5  | 38420.3  | 38421.43333      |
| 38    | 3      | 740316 | 1896748 | 1732  | 38417.5  | 38418.6  | 38418.5  | 38418.2          |
| 39    | 3      | 740294 | 1896744 | 1739  | 38421.4  | 38426.6  | 38426.7  | 38424.9          |
| 40    | 3      | 740280 | 1896742 | 1729  | 38426.9  | 38428.1  | 38427.1  | 38427.36667      |

|    |         |        |         |      |         |         |         |             |
|----|---------|--------|---------|------|---------|---------|---------|-------------|
| 41 | 3       | 740268 | 1896750 | 1728 | 38411.5 | 38411.5 | 38412   | 38411.66667 |
| 42 | 3       | 740251 | 1896753 | 1727 | 38375.8 | 38376.6 | 38376.3 | 38376.23333 |
| 43 | 3       | 740240 | 1896755 | 1725 | 38371.9 | 38371.2 | 38370.8 | 38371.3     |
| 44 | 3       | 740220 | 1896757 | 1720 | 38377.1 | 38376.5 | 38376.6 | 38376.73333 |
| 45 | 3       | 740195 | 1896777 | 1718 | 38381.6 | 38381   | 38381.6 | 38381.4     |
| 46 | 3       | 740169 | 1896777 | 1715 | 38377.6 | 38378.3 | 38378   | 38377.96667 |
| 47 | 3       | 740155 | 1896773 | 1710 | 38385.3 | 38385   | 38385.2 | 38385.16667 |
| 48 | 3       | 740141 | 1896774 | 1706 | 38380.2 | 38380.7 | 38380.6 | 38380.5     |
| 49 | 3       | 740124 | 1896781 | 1702 | 38382   | 38388.8 | 38388.6 | 38386.46667 |
| 50 | 3       | 740107 | 1896779 | 1700 | 38389   | 38388.7 | 38388.4 | 38388.7     |
| 51 | 3       | 740087 | 1896781 | 1697 | 38388.7 | 38390.3 | 38390.3 | 38389.76667 |
| 52 | 3       | 740073 | 1896786 | 1691 | 38397.7 | 38397   | 38397   | 38397.23333 |
| 53 | 3       | 740056 | 1896785 | 1688 | 38401.6 | 38402.5 | 38403   | 38402.36667 |
| 54 | 3       | 740038 | 1896785 | 1682 | 38394   | 38396.8 | 38395.2 | 38395.33333 |
| 55 | 3       | 740027 | 1896784 | 1680 | 38398.3 | 38399.1 | 38399.1 | 38398.83333 |
| 56 | 3       | 740005 | 1896781 | 1678 | 38397.9 | 38397   | 38397.1 | 38397.33333 |
| 57 | 3       | 739990 | 1896772 | 1675 | 38401.2 | 38401.5 | 38401.7 | 38401.46667 |
| 58 | 4       | 740202 | 1896777 | 1717 | 38412.8 | 38412.9 | 38413.1 | 38412.93333 |
| 59 | 4       | 740224 | 1896775 | 1718 | 38412   | 38412.1 | 38412   | 38412.03333 |
| 60 | 4       | 740246 | 1896773 | 1720 | 38415.7 | 38415.8 | 38415.9 | 38415.8     |
| 61 | 4       | 740259 | 1896772 | 1725 | 38428.8 | 38428.8 | 38428.6 | 38428.73333 |
| 62 | 4       | 740268 | 1896768 | 1739 | 38453.5 | 38452.7 | 38452.6 | 38452.93333 |
| 63 | 4       | 740280 | 1896766 | 1740 | 38467.5 | 38467.7 | 38467.4 | 38467.53333 |
| 64 | 4       | 740306 | 1896763 | 1742 | 38462.7 | 38462.8 | 38462.6 | 38462.7     |
| 65 | 4       | 740317 | 1896761 | 1742 | 38461.1 | 38460.1 | 38461   | 38460.73333 |
| 66 | 4       | 740330 | 1896781 | 1743 | 38444.7 | 38444.7 | 38444.5 | 38444.63333 |
| 67 | 4       | 740341 | 1896794 | 1742 | 38422.5 | 38422.4 | 38422   | 38422.3     |
| 68 | 5 (río) | 740344 | 1896800 | 1740 | 38410.4 | 38410.8 | 38410.3 | 38410.5     |
| 69 | 5 (río) | 740353 | 1896816 | 1739 | 38410.1 | 38409.9 | 38411.8 | 38410.6     |
| 70 | 5 (río) | 740344 | 1896811 | 1731 | 38400.3 | 38400.1 | 38399.8 | 38400.06667 |
| 71 | 5 (río) | 740337 | 1896815 | 1722 | 38394.9 | 38394.9 | 38394.8 | 38394.86667 |
| 72 | 5 (río) | 740327 | 1896813 | 1720 | 38407.1 | 38406.9 | 38406.4 | 38406.8     |
| 73 | 5 (río) | 740309 | 1896809 | 1717 | 38397.9 | 38398.3 | 38397.6 | 38397.93333 |
| 74 | 5 (río) | 740304 | 1896809 | 1710 | 38479.4 | 38479.5 | 38478.8 | 38479.23333 |
| 75 | 5 (río) | 740276 | 1896813 | 1714 | 38415.2 | 38414.2 | 38414.2 | 38414.53333 |
| 76 | 5 (río) | 740258 | 1896819 | 1711 | 38354.6 | 38354.3 | 38354.2 | 38354.36667 |
| 77 | 5 (río) | 740247 | 1896830 | 1709 | 38368.3 | 38368   | 38367.7 | 38368       |
| 78 | 5 (río) | 740234 | 1896832 | 1708 | 38380.9 | 38380.8 | 38381.2 | 38380.96667 |
| 79 | 5 (río) | 740208 | 1896836 | 1707 | 38394.5 | 38394.4 | 38394.8 | 38394.56667 |
| 80 | 5 (río) | 740189 | 1896846 | 1705 | 38406.5 | 38406   | 38406.4 | 38406.3     |
| 81 | 5 (río) | 740180 | 1896854 | 1706 | 38407.9 | 38407.4 | 38406.3 | 38407.2     |
| 82 | 5 (río) | 740169 | 1896844 | 1700 | 38411.1 | 38407.6 | 38407.6 | 38408.76667 |

|     |         |        |         |      |         |         |         |             |
|-----|---------|--------|---------|------|---------|---------|---------|-------------|
| 83  | 5 (río) | 740149 | 1896831 | 1698 | 38402.4 | 38401.5 | 38401.5 | 38401.8     |
| 84  | 5 (río) | 740110 | 1896821 | 1697 | 38407.6 | 38407.8 | 38408.2 | 38407.86667 |
| 85  | 5 (río) | 740078 | 1896814 | 1696 | 38409.7 | 38410   | 38410.2 | 38409.96667 |
| 86  | 5 (río) | 740046 | 1896820 | 1695 | 38415.8 | 38415.8 | 38415.9 | 38415.83333 |
| 87  | 5 (río) | 740024 | 1896829 | 1690 | 38424.7 | 38424.8 | 38424.7 | 38424.73333 |
| 88  | 5 (río) | 740007 | 1896820 | 1685 | 38421.6 | 38421.7 | 38421.3 | 38421.53333 |
| 89  | 6       | 740024 | 1896803 | 1681 | 38420   | 38419.5 | 38419.5 | 38419.66667 |
| 90  | 6       | 740051 | 1896802 | 1697 | 38410.4 | 38410.5 | 38410.7 | 38410.53333 |
| 91  | 6       | 740070 | 1896801 | 1699 | 38405.6 | 38405   | 38405.1 | 38405.23333 |
| 92  | 6       | 740094 | 1896799 | 1702 | 38402.1 | 38402.2 | 38402.4 | 38402.23333 |
| 93  | 6       | 740112 | 1896795 | 1703 | 38398.5 | 38398.7 | 38398.7 | 38398.63333 |
| 94  | 6       | 740137 | 1896794 | 1706 | 38392.5 | 38393.2 | 38392.8 | 38392.83333 |
| 95  | 6       | 740158 | 1896810 | 1708 | 38386.4 | 38387.3 | 38387.5 | 38387.06667 |
| 96  | 6       | 740183 | 1896807 | 1710 | 38380.9 | 38381.2 | 38381.4 | 38381.16667 |
| 97  | 6       | 740220 | 1896797 | 1712 | 38376   | 38376.3 | 38376.5 | 38376.26667 |
| 98  | 6       | 740235 | 1896787 | 1731 | 38398.8 | 38398.1 | 38398   | 38398.3     |
| 99  | 6       | 740252 | 1896783 | 1738 | 38430.1 | 38430.4 | 38430.3 | 38430.26667 |
| 100 | 6       | 740259 | 1896783 | 1728 | 38439.6 | 38439.5 | 38439.6 | 38439.56667 |
| 101 | 6       | 740268 | 1896783 | 1724 | 38441.4 | 38443.1 | 38442.3 | 38442.26667 |
| 102 | 6       | 740272 | 1896779 | 1728 | 38444.5 | 38443.9 | 38443.6 | 38444       |
| 103 | 6       | 740312 | 1896783 | 1733 | 38419.6 | 38419   | 38418.8 | 38419.13333 |
| 104 | 6       | 740322 | 1896782 | 1750 | 38386   | 38386   | 38386.2 | 38386.06667 |
| 105 | 6       | 740286 | 1896702 | 1747 | 38449.7 | 38449.5 | 38449.9 | 38449.7     |
| 106 | 6       | 740272 | 1896706 | 1746 | 38457.5 | 38457.7 | 38457.6 | 38457.6     |
| 107 | 6       | 740250 | 1896701 | 1744 | 38392.1 | 38392.2 | 38392.4 | 38392.23333 |
| 108 | 6       | 740229 | 1896696 | 1740 | 38373   | 38372.4 | 38372.6 | 38372.66667 |
| 109 | 6       | 740217 | 1896694 | 1741 | 38361.2 | 38361.4 | 38361.3 | 38361.3     |
| 110 | 6       | 740198 | 1896692 | 1716 | 38368.9 | 38369   | 38369.1 | 38369       |
| 111 | 6       | 740154 | 1896698 | 1714 | 38397   | 38397.9 | 38397.3 | 38397.4     |

Anexo 10. Tabla de datos de lectura crudos en la zona de levantamiento.

| CD      | CMT corregido | Anomalía | IGRF (nT) | Inclinación | Declinación |
|---------|---------------|----------|-----------|-------------|-------------|
| -5.621  | 38395.42      | -115.48  | 38510.90  | 44.543      | 3.2782      |
| -6.643  | 38397.18      | -113.72  | 38510.90  | 44.543      | 3.2782      |
| -9.709  | 38402.54      | -108.36  | 38510.90  | 44.543      | 3.2782      |
| -11.242 | 38406.44      | -104.46  | 38510.90  | 44.543      | 3.2782      |
| -12.775 | 38407.54      | -103.36  | 38510.90  | 44.543      | 3.2782      |
| -14.308 | 38410.44      | -100.46  | 38510.90  | 44.543      | 3.2782      |
| -15.3   | 38411.87      | -99.03   | 38510.90  | 44.543      | 3.2782      |
| -13.965 | 38412.47      | -98.44   | 38510.90  | 44.543      | 3.2782      |
| -12.363 | 38417.33      | -93.57   | 38510.90  | 44.543      | 3.2782      |

|         |          |         |          |        |        |
|---------|----------|---------|----------|--------|--------|
| -10.494 | 38416.26 | -94.64  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -8.358  | 38415.19 | -95.71  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7.324  | 38417.59 | -93.31  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7.27   | 38406.77 | -104.13 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7.228  | 38405.59 | -105.31 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7.156  | 38416.02 | -94.88  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7.132  | 38410.93 | -99.97  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7.12   | 38409.45 | -101.45 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7.054  | 38404.99 | -105.91 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7      | 38407.97 | -102.93 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7      | 38406.47 | -104.43 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7.712  | 38408.15 | -102.75 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -14.832 | 38418.33 | -92.57  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -17.324 | 38415.72 | -95.18  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -17.578 | 38412.31 | -98.59  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -17.463 | 38410.70 | -100.20 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -17.371 | 38412.67 | -98.23  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -17.325 | 38408.49 | -102.41 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -17.279 | 38408.95 | -101.95 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -17.21  | 38405.38 | -105.52 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -17.095 | 38402.00 | -108.90 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -3.864  | 38380.80 | -130.10 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -4.398  | 38379.03 | -131.87 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -4.932  | 38379.87 | -131.03 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -5.11   | 38396.34 | -114.56 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7.068  | 38439.10 | -71.80  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -7.958  | 38378.82 | -132.08 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -8.67   | 38430.10 | -80.80  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -13.382 | 38431.58 | -79.32  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -19.272 | 38444.17 | -66.73  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -23.395 | 38450.76 | -60.14  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -25.162 | 38436.83 | -74.07  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -25.642 | 38401.88 | -109.02 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -24.266 | 38395.57 | -115.33 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -22.89  | 38399.62 | -111.28 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -21.17  | 38402.57 | -108.33 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -19.106 | 38397.07 | -113.83 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -16.23  | 38401.40 | -109.50 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -16.805 | 38397.31 | -113.60 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -17.61  | 38404.08 | -106.82 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -17.955 | 38406.66 | -104.24 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -18.3   | 38408.07 | -102.83 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |

|         |          |         |          |        |        |
|---------|----------|---------|----------|--------|--------|
| -18.645 | 38415.88 | -95.02  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -18.99  | 38421.36 | -89.54  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -19.565 | 38414.90 | -96.00  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -20.14  | 38418.97 | -91.93  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -20.83  | 38418.16 | -92.74  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -21.405 | 38422.87 | -88.03  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -3.916  | 38416.85 | -94.05  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -4.806  | 38416.84 | -94.06  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -8.786  | 38424.59 | -86.31  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -10.706 | 38439.44 | -71.46  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -14.162 | 38467.10 | -43.80  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -17.334 | 38484.87 | -26.03  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -15.558 | 38478.26 | -32.64  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -12.672 | 38473.41 | -37.49  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -12.224 | 38456.86 | -54.04  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -12.392 | 38434.69 | -76.21  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -12.56  | 38423.06 | -87.84  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -12.84  | 38423.44 | -87.46  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -13.512 | 38413.58 | -97.32  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -15.203 | 38410.07 | -100.83 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -19.802 | 38426.60 | -84.30  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -23.89  | 38421.82 | -89.08  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -27.467 | 38506.70 | -4.20   | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -28.876 | 38443.41 | -67.49  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -28.256 | 38382.62 | -128.28 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -27.884 | 38395.88 | -115.02 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -27.388 | 38408.35 | -102.55 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -27.016 | 38421.58 | -89.32  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -26.644 | 38432.94 | -77.96  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -26.024 | 38433.22 | -77.68  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -25.032 | 38433.80 | -77.10  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -24.234 | 38426.03 | -84.87  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -23.144 | 38431.01 | -79.89  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -22.49  | 38432.46 | -78.44  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -21.618 | 38437.45 | -73.45  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -20.746 | 38445.48 | -65.42  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -19.656 | 38441.19 | -69.71  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -14.86  | 38434.53 | -76.37  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -12.026 | 38422.56 | -88.34  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -15.624 | 38420.86 | -90.04  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -16.468 | 38418.70 | -92.20  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -18.156 | 38416.79 | -94.11  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |

|         |          |         |          |        |        |
|---------|----------|---------|----------|--------|--------|
| -19     | 38411.83 | -99.07  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -20.266 | 38407.33 | -103.57 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -21.11  | 38402.28 | -108.62 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -29.749 | 38406.02 | -104.88 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -29.41  | 38427.71 | -83.19  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -28.845 | 38459.11 | -51.79  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -28.506 | 38468.07 | -42.83  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -27.602 | 38469.87 | -41.03  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -26.852 | 38470.85 | -40.05  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -27.896 | 38447.03 | -63.87  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -29.114 | 38415.18 | -95.72  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -31.898 | 38481.60 | -29.30  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -32.246 | 38489.85 | -21.05  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -32.42  | 38424.65 | -86.25  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -32.768 | 38405.43 | -105.47 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -33.116 | 38394.42 | -116.48 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -33.464 | 38402.46 | -108.44 | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |
| -34.16  | 38431.56 | -79.34  | 38510.90 | 44.543 | 3.2782 |

Anexo 11. Datos corregidos y de anomalía magnética

|        |                        |                                 |          |         |            |           |              |  |
|--------|------------------------|---------------------------------|----------|---------|------------|-----------|--------------|--|
| LUGAR: |                        | colindancia San Pablo y Viguera |          |         |            |           |              |  |
| FECHA: |                        | 10 de Julio de 2008             |          |         |            |           |              |  |
| SEV:   | 1                      |                                 | x        | y       | z          |           | OBSERVADOR:  |  |
| PERFIL | calle colindancia V-SP |                                 | 740079   | 1896237 | 1700       |           |              |  |
| AB/2   | MN                     | K                               | Pot Nat  | Pot Ind | CORRIENTE  | DIF       | Resistividad |  |
| 2.5    | 2                      | 9.8175                          | -0.005   | 1.16175 | 0.11475    | 1.16675   | 99.82        |  |
| 4      | 2                      | 25.1328                         | 0.003    | 0.31325 | 0.12395    | 0.31025   | 62.91        |  |
| 6      | 2                      | 56.5488                         | 0.006    | 0.1542  | 0.13742    | 0.1482    | 60.98        |  |
| 8      | 2                      | 100.5312                        | 0.005    | 0.06815 | 0.11045    | 0.06315   | 57.48        |  |
| 8      | 5                      | 40.21248                        | 0.015    | 0.1482  | 0.1108     | 0.1332    | 48.34        |  |
| 10     | 5                      | 62.832                          | 0.01     | 0.0903  | 0.1012     | 0.0803    | 49.86        |  |
| 15     | 5                      | 141.372                         | 0.01     | 0.05135 | 0.0999     | 0.04135   | 58.52        |  |
| 20     | 5                      | 251.328                         | 0.01     | 0.08125 | 0.2495     | 0.07125   | 71.77        |  |
| 20     | 12                     | 104.72                          | 0.008    | 0.1468  | 0.2507     | 0.1388    | 57.98        |  |
| 25     | 12                     | 163.625                         | 0.007    | 0.11145 | 0.25205    | 0.10445   | 67.81        |  |
| 35     | 12                     | 320.705                         | 0.003    | 0.0509  | 0.20825    | 0.0479    | 73.77        |  |
| 45     | 12                     | 530.145                         | 0        | 0.0188  | 0.0837     | 0.0188    | 119.08       |  |
| 45     | 20                     | 318.087                         | 0.002933 | 0.0736  | 0.12595    | 0.0706667 | 178.47       |  |
| 60     | 20                     | 565.488                         | 0.0055   | 0.08475 | 0.1602     | 0.07925   | 279.74       |  |
| 80     | 20                     | 1005.312                        | 0.001    | 0.0145  | 0.03766667 | 0.0135    | 360.31       |  |
| 100    | 20                     | 1570.8                          | -0.003   | 0.04005 | 0.16505    | 0.04305   | 409.71       |  |
| 100    | 40                     | 785.4                           | 0.003    | 0.1003  | 0.16395    | 0.0973    | 466.11       |  |
| 120    | 40                     | 1130.976                        | 0.003    | 0.11115 | 0.2108     | 0.10815   | 580.24       |  |
| 140    | 40                     | 1539.384                        | 0.0012   | 0.0365  | 0.09175    | 0.0353    | 592.26       |  |

Anexo 12. Datos crudos obtenidos del SEV 1, para cálculo de resistividad.

|         |                        |          |          |         |           |             |              |
|---------|------------------------|----------|----------|---------|-----------|-------------|--------------|
| LUGAR:  | san pablo sev 2        |          |          |         |           |             |              |
| FECHA:  | 11 de febrero del 2023 |          |          |         |           |             |              |
| SEV:    | 2                      |          | x        | y       | z         | OBSERVADOR: |              |
| PERFIL: | sev en vereda          |          | 740147   | 1896461 | 1710      |             |              |
| AB/2    | MN                     | K        | Pot Nat  | Pot Ind | CORRIENTE | DIF         | Resistividad |
| 2.5     | 2                      | 9.8175   | 0.00225  | 1.1128  | 0.749     | 1.11055     | 14.56        |
| 4       | 2                      | 25.1328  | 0.0015   | 0.3257  | 0.784     | 0.3242      | 10.39        |
| 6       | 2                      | 56.5488  | 0.00155  | 0.203   | 0.993     | 0.20145     | 11.47        |
| 8       | 2                      | 100.5312 | 0.0014   | 0.1608  | 1.303     | 0.1594      | 12.30        |
| 8       | 5                      | 40.21248 | -0.0052  | 0.2727  | 1.306     | 0.2779      | 8.56         |
| 10      | 5                      | 62.832   | -0.00075 | 0.1085  | 0.723     | 0.10925     | 9.49         |
| 15      | 5                      | 141.372  | 0.0015   | 0.1814  | 2.296     | 0.1799      | 11.08        |
| 20      | 5                      | 251.328  | 0        | 0.1251  | 2.293     | 0.1251      | 13.71        |
| 20      | 12                     | 104.72   | 0.0031   | 0.27615 | 2.3865    | 0.27305     | 11.98        |
| 25      | 12                     | 163.625  | 0        | 0.09625 | 1.158     | 0.09625     | 13.60        |
| 35      | 12                     | 320.705  | 0        | 0.0451  | 0.9935    | 0.0451      | 14.56        |
| 35      | 20                     | 192.423  | -0.004   | 0.0693  | 0.9815    | 0.0733      | 14.37        |
| 45      | 20                     | 318.087  | 0.001    | 0.04165 | 0.8095    | 0.04065     | 15.97        |
| 60      | 20                     | 565.488  | -0.0012  | 0.03365 | 1.0835    | 0.03485     | 18.19        |
| 80      | 20                     | 1005.312 | 0.00025  | 0.0026  | 0.0635    | 0.00235     | 37.20        |
| 80      | 40                     | 502.656  | -0.00015 | 0.0034  | 0.063     | 0.00355     | 28.32        |
| 100     | 40                     | 785.4    | 0        | 0.05    | 1.215     | 0.05        | 32.32        |
| 120     | 40                     | 1130.976 | 0        | 0.05165 | 1.4865    | 0.05165     | 39.30        |
| 140     | 40                     | 1539.384 | 0.0005   | 0.06205 | 2.005     | 0.06155     | 47.26        |

Anexo 13. Datos crudos obtenidos del SEV 2, para cálculo de resistividad.

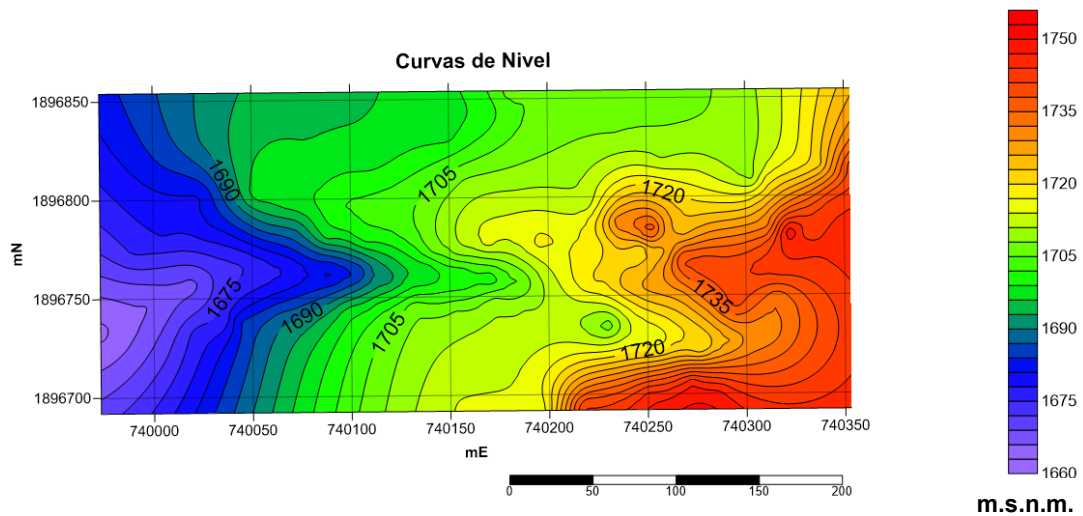
1)

| Valores promediados |             |
|---------------------|-------------|
| ab/2                | rho         |
| 2.5                 | 99.82       |
| 4                   | 70.00       |
| 6                   | 60.98       |
| 8                   | 52.91049293 |
| 10                  | 49.86       |
| 15                  | 58.52       |
| 20                  | 64.87511454 |
| 25                  | 67.81       |
| 35                  | 80.00       |
| 45                  | 148.7727976 |
| 60                  | 279.74      |
| 80                  | 360.31      |
| 100                 | 437.913013  |
| 120                 | 580.2421935 |
| 140                 | 592.26      |

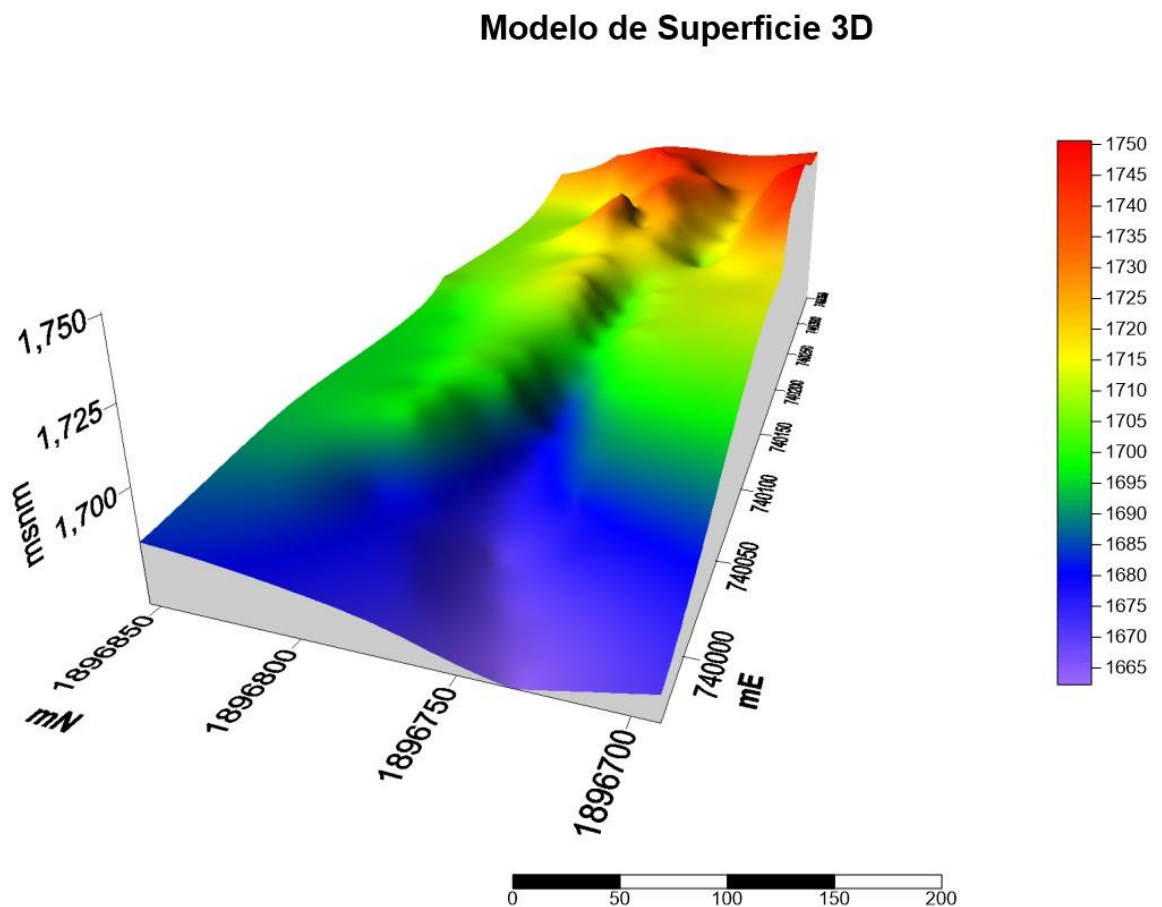
2)

| valores promedio |                 |
|------------------|-----------------|
| ab/2             | rho             |
| 2.5              | 14.56           |
| 4                | 13.70           |
| 6                | 11.50           |
| 8                | 10.427494772300 |
| 10               | 9.494323651     |
| 15               | 11.07701341     |
| 20               | 12.84663337     |
| 25               | 13.60009175     |
| 35               | 14.46444233     |
| 45               | 15.97311495     |
| 60               | 18.18851574     |
| 80               | 25              |
| 100              | 32.32           |
| 120              | 39.30           |
| 140              | 47.26           |

Anexo 14. Columna de datos corregidos del SEV 1. (1). Columna de datos corregidos del SEV 2. (2)

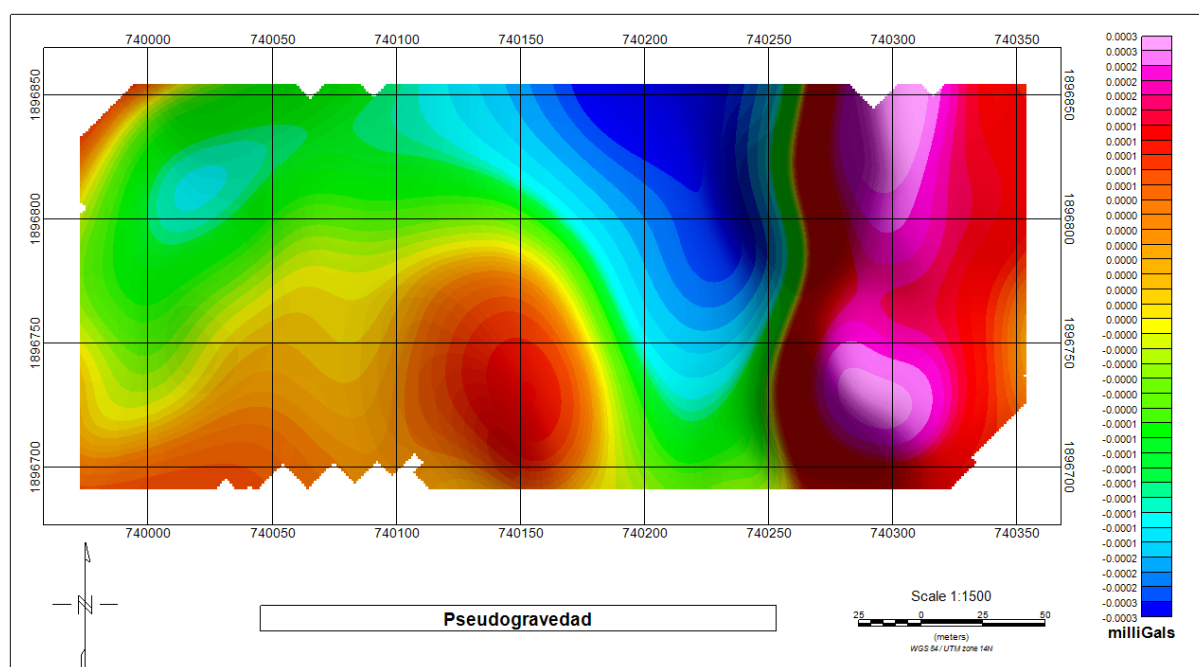


Anexo 15. Modelo de curvas de nivel obtenido por la interpolación de los datos de elevación levantados en la zona de estudio.

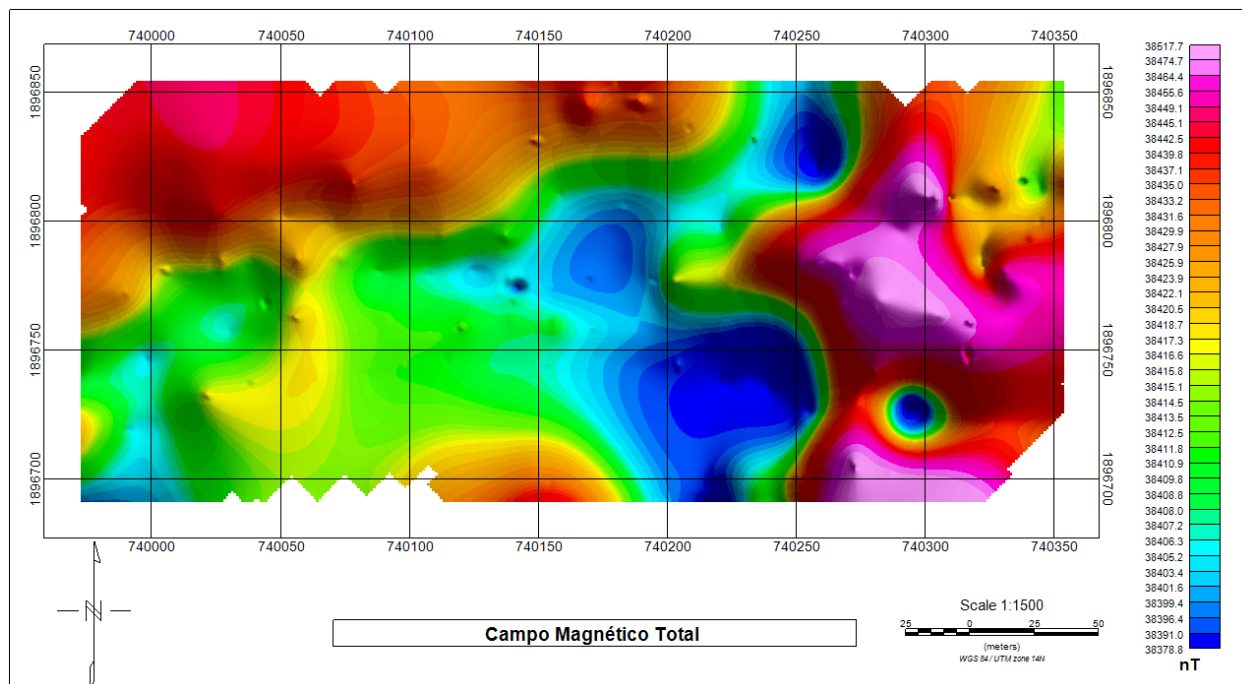


Anexo 16. Modelo 3D de elevaciones generado en Surfer de la zona de estudio.

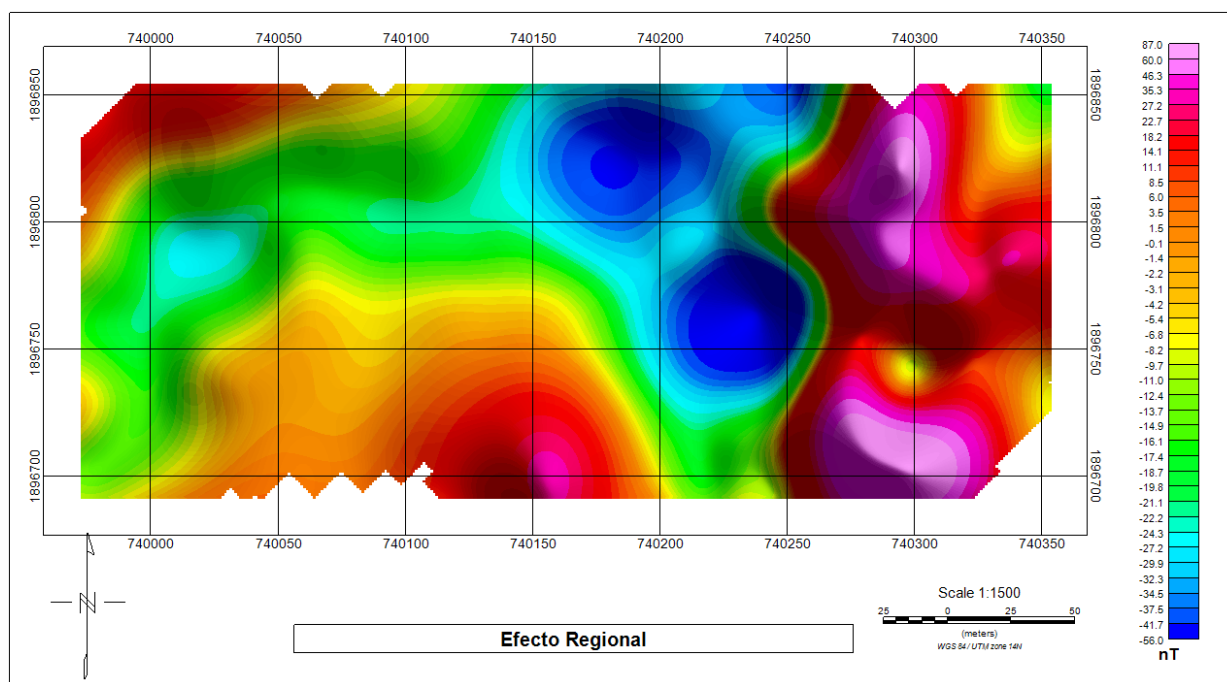




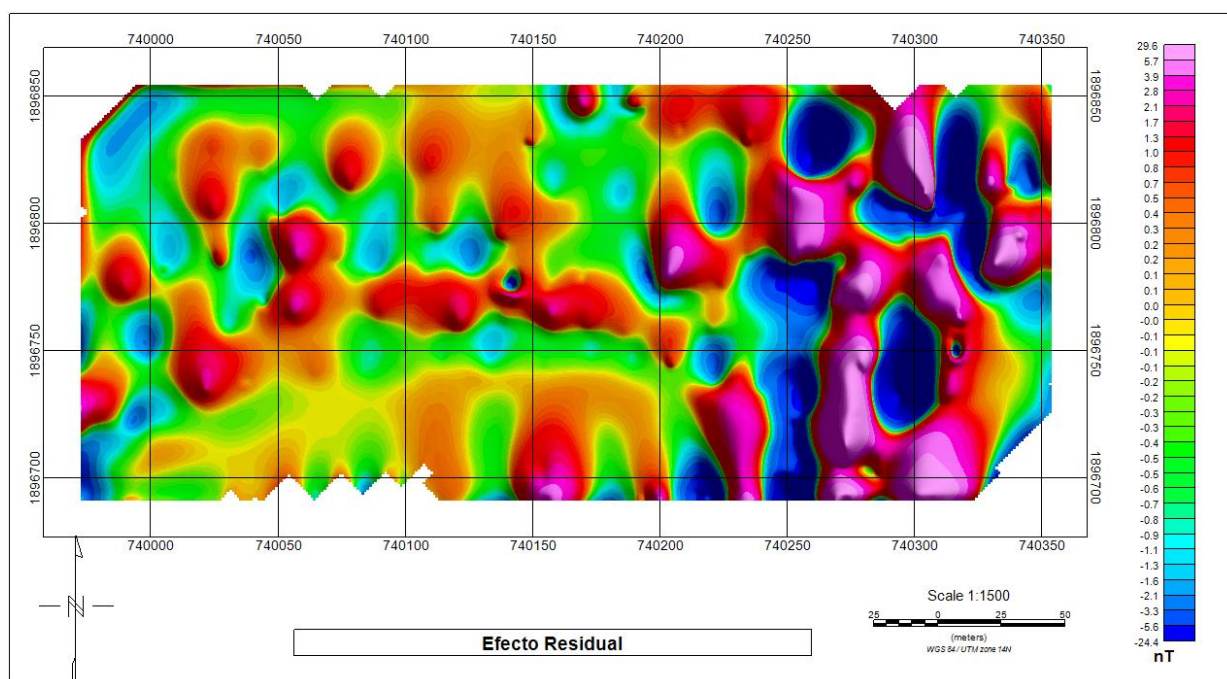
Anexo 17. Pseudogravedad en la zona de estudio.



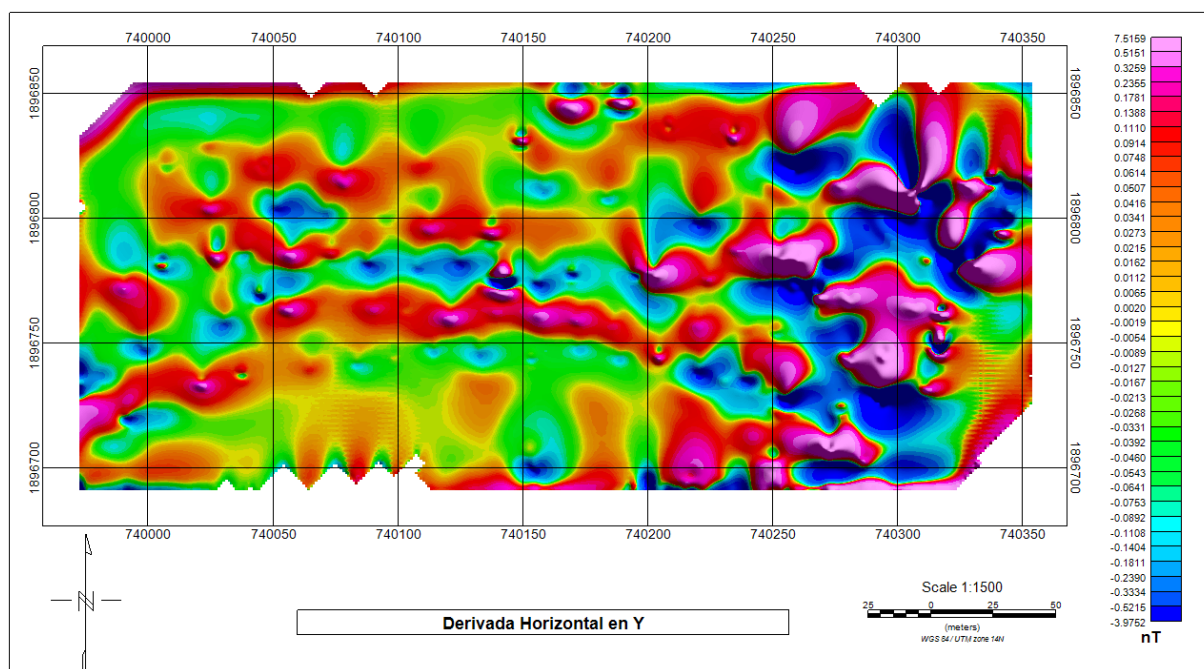
Anexo 18. Campo magnético total de la zona de estudio.



Anexo 19. Efecto regional obtenido a partir del espectro de potencia.



Anexo 19a. Efecto residual/local obtenido al separar las señales del espectro de potencia.



Anexo 20. Derivada horizontal en dirección Y, de la anomalía local.

Werner - generate Werner solutions ? X

X Channel ☒

Y Channel Y

Elev. Channel Z

Mag Channel Señal

Horizontal Derivative <Calculate>

Topography <None>

Min. Depth 1

Max. Depth 400

Min. Window Length 1000

Max. Window Length 5000

Window Expansion Increment 1

Window Shift Increment 0

Detrend Order 1

Relative Strike 90.0

Field Strength 38510.9

Inclination 44.543

Declination 3.2782

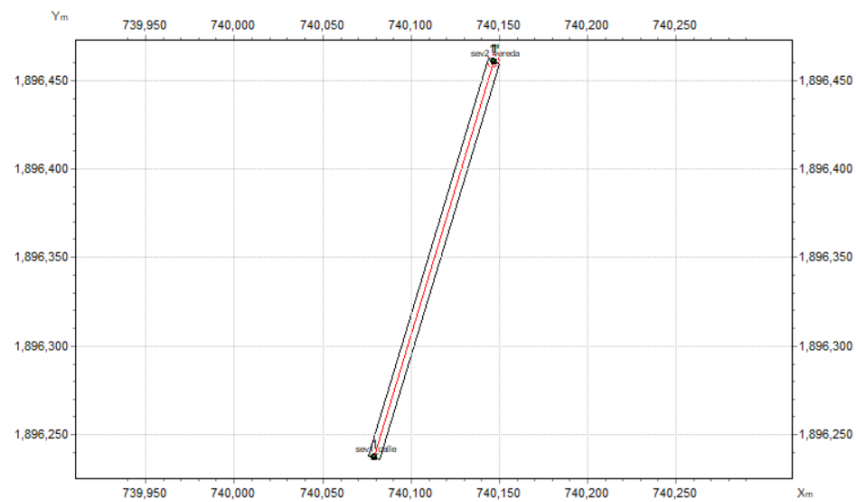
Residual cut-off 0.0

X cut-off 20.0

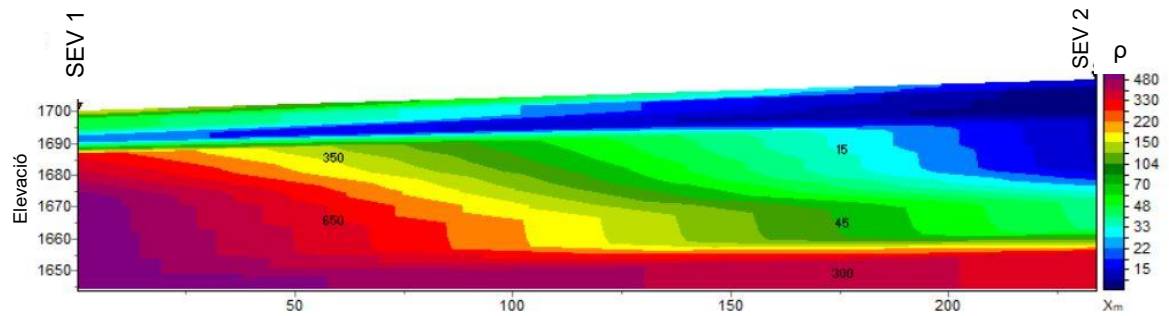
Output Database Name .\Base\_Werner\_Depths\_S

OK Cancel

Anexo 21. Parámetros para los cálculos de profundidad con Werner Solutions.



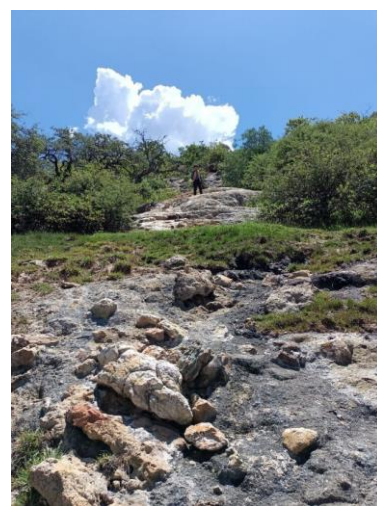
Anexo 22. Perfil geoelectrico para los sondeos 1 y 2. Trazado en el software ZONDIP1D.



Anexo 23. Pseudo-sección de resistividad eléctrica con espesores suavizados generado con el software ZONDIP1D, al extrapolar los datos de los dos sondeos eléctricos verticales en el sitio.

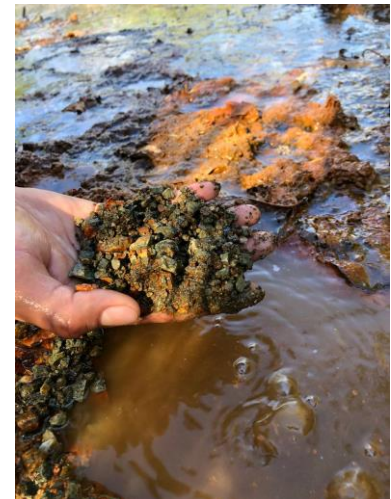
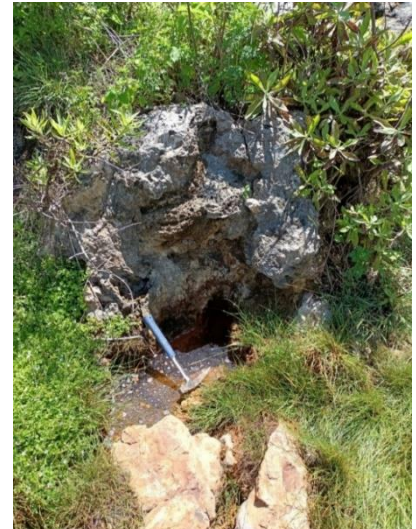


## 9. Reporte fotográfico.



*Fotografías de las mineralizaciones en la zona de estudio San Pablo en la parte superior donde existe esta pequeña cueva. Con casi 1 metro de altura desde la base del piso mineral. 2023.*



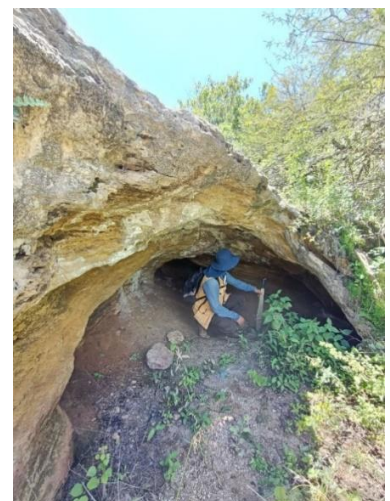


*Fotografías en campo de las formaciones de suelo mineral y conglomerados en Las Salinas San Pablo. Vista al valle desde la parte superior del plano de falla en las Salinas San Pablo. Es notable el recubrimiento mineral sobre el suelo en la zona de escurrimiento. Puntos de escurrimiento y manantiales salados de coloración cobriza en Las Salinas San Pablo. Estos no llegan a secarse y son los flujos permanentes. 2023.*





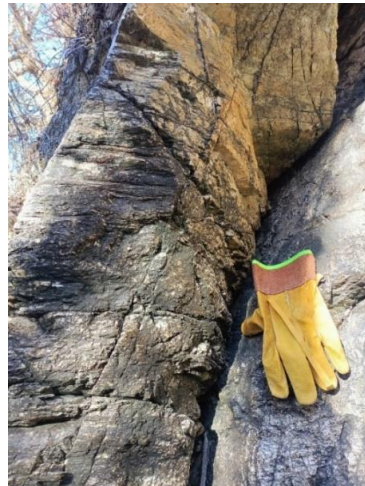
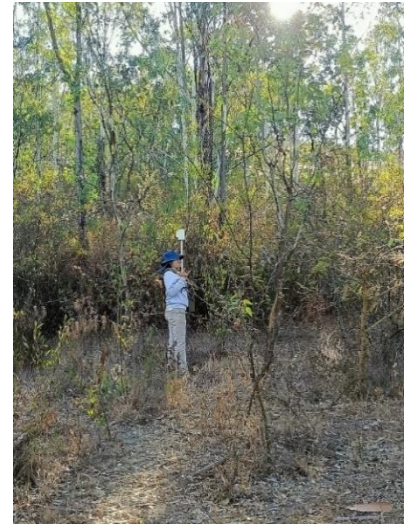
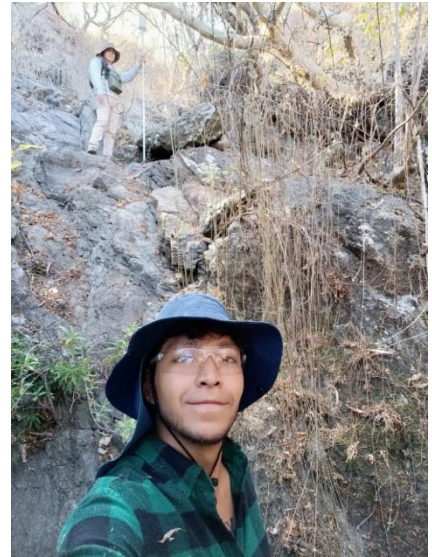
*Muestras recolectadas en los escurrimientos y arroyos.  
La mineralización en la zona ha formado rocas bandeadas de color blanco que tienen espesores de hasta 4 cm y se encontraron asociados con sedimentos calcáreos. 2023.*



*Arriba. Cuevas/cavidades naturales presentes hacia la parte inferior de la plataforma mineral. En esta zona no se hacen presentes escurrimientos o flujos activos. 2023.*

*Abajo. Derecha: Fotografías aéreas de la zona de levantamiento magnético terrestre, al fondo cerros del complejo de milonitas Juárez. Izquierda: Toma aérea de los paleoflujos o manantiales anteriores que formaron la plataforma mineral. 2024.*





Arriba: Izquierda a derecha: Ensamble y calibración del equipo de prospección magnética terrestre.  
Coordenadas del punto de lectura. Inicio de levantamiento en campo.

Abajo: Rocas miloníticas aflorando en arroyo. Fotografías del sitio de levantamiento en el mes de enero. 2023.





*Tomas aéreas realizadas en los afloramientos de Las Salinas Viguera. Izquierda: Vista aérea de los Pilares de Las Salinas de Viguera o “Los Monos” como son llamados localmente. Pozo artesanal en unos de los predios cercanos. Material del fondo de pozo, brechas angulosas y gravas resultado del rompimiento de la arenisca. 2023.*