

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra con orientación en
Geofísica Aplicada**

**Modelado de datos electromagnéticos para
exploración hidrogeológica en Ensenada, Baja
California**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Fernando Mireles Arellano

Ensenada, Baja California, México

2022

Tesis defendida por

Fernando Mireles Arellano

y aprobada por el siguiente comité

Dr. Diego Ruiz Aguilar

Director de tesis

Dr. Carlos Francisco Flores Luna

Dr. José Manuel Romo Jones

Dr. Oscar Uriel Velasco Fuentes



Dr. Javier Alejandro González Ortega

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dr. Pedro Negrete Regagnon

Director de Estudios de Posgrado

Fernando Mireles Arellano © 2022

queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis

Resumen de la tesis que presenta **Fernando Mireles Arellano**, como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada

Modelado de datos electromagnéticos para exploración hidrogeológica en Ensenada, Baja California

Resumen aprobado por:

Dr. Diego Ruiz Aguilar

Director de tesis

La Ciudad de Ensenada, Baja California, presenta problemas de escasez de agua debido al crecimiento exponencial de la población; por lo tanto, la necesidad de satisfacer el abastecimiento día a día se ha convertido en un reto ya que la mayor parte del agua que se utiliza en la ciudad proviene de pozos y norias ubicados en puntos estratégicos de extracción de los acuíferos Ensenada y Maneadero, los cuales ya presentan una explotación intensiva de acuerdo al último informe proporcionado por la CONAGUA en 2020. Por lo tanto, el propósito de este trabajo es explorar y caracterizar el sitio de estudio mediante la aplicación de dos técnicas geofísicas con el fin de recopilar información hidrológica mediante la aplicación de métodos electromagnéticos. Los métodos electromagnéticos son sensibles a los cambios de conductividad en el subsuelo y pueden alcanzar desde decenas hasta cientos de metros de profundidad para ser investigados, por lo que con su aplicación se pudo delimitar y conocer las condiciones del sitio de estudio. Los métodos que se aplicaron son el Transitorio Electromagnético (TEM) y el Audiomagnetotelúrico (AMT). Los datos TEM y AMT fueron adquiridos en 8 puntos distribuidos espacialmente. Una vez adquiridos los datos, se aplicó el modelado inverso 1D a los datos TEM y AMT con las técnicas de Occam y Marquardt. Posteriormente se realizó la inversión 3D de los datos AMT para después integrar ambos métodos y obtener el modelo geoelectrico óptimo que caracteriza la zona de estudio. Finalmente, los modelos inversos son correlacionados con la información geológica obtenida a partir de la carta geológica minera. De esta manera, se obtiene un modelo geológico para el sitio de estudio mostrando así la efectividad de los métodos electromagnéticos para la exploración y caracterización hídrica.

Palabras clave: acuífero, electromagnéticos, método de inversión, modelo de resistividad

Abstract of the thesis presented by **Fernando Mireles Arellano**, as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Applied Geophysics.

Electromagnetic data modeling for hydrogeological exploration in Ensenada, Baja California

Abstract approved by:

Dr. Diego Ruiz Aguilar

Thesis Director

The City of Ensenada, Baja California, has problems of water shortage due to the exponential growth of the population; therefore, the need to satisfy the supply day by day has become a challenge. Most of the water used in the city comes from wells and norias located in strategic extraction points of the Ensenada and Maneadero aquifers, which already have intensive exploitation according to the last report provided by CONAGUA, in 2020. Thereby, the purpose of this work is to explore and characterize the study site by applying two geophysical techniques in order to collect hydrological information applying electromagnetic methods. Electromagnetic methods are sensitive to changes in conductivity in the subsoil, can reach from tens to a few hundred meters of research depth, so that with their application it is possible to delimit and know study site conditions. The methods to be applied are the Transient Electromagnetic (TEM) and Audiomagnetotelluric (AMT). TEM and AMT data were observed at 8 spatially distributed points. We applied 1D inverse modeling to TEM and AMT data with Occam and Marquardt techniques. Subsequently, 3D inversion of AMT data is carried out to integrate both methods and obtain the optimal geoelectric model that characterizes the study area. Finally, the inverse models are correlated with geological information obtained from the mining geological map. In this way, we obtain a geological model for the study site showing the effectiveness of electromagnetic methods for water exploration and characterization.

Keywords: aquifer, electromagnetic, inversion method, resistivity model

Dedicatoria

Sin presión, no habría diamantes. Mary Case

A mis profesores por formarme y conducirme por el camino de la ciencia, personas de gran sabiduría quienes me brindaron su tiempo y conocimientos. Gracias, por que logre culminar satisfactoriamente cada uno de mis objetivos académicos.

A mis padres y hermanos ya que a pesar de la distancia me brindaron su apoyo para seguir adelante y no rendirme. Quienes me han visto crecer y han creído en mí siempre.

A mis amigos Daniel, Carlos, Héctor y Miguel que compartieron conmigo esta etapa de mi vida y me apoyaron cuando lo necesité, creyendo en mi y motivándome a culminar mi proyecto.

A mi compañera de toda la vida, Amayrani que siempre ha estado en los momentos de éxito, pero también fracaso, a ella que me conoce como la palma de su mano y que a pesar de los tropiezos pone toda su confianza en mí para ser mejor cada día

Y a todos aquellos apasionados que como yo siguen el camino de las Ciencias de la Tierra.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y al Posgrado en Ciencias de la Tierra por formar parte de mi crecimiento en el ámbito profesional y académico. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. No. de apoyo: 753433.

Mi agradecimiento al director de esta tesis, el Dr. Diego Ruiz Aguilar, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas.

A los miembros de mi comité evaluador, Dr. Carlos Francisco Flores Luna, Dr. José Manuel Romo Jones y al Dr. Oscar Uriel Velasco Fuentes por su tiempo para atender todas y cada una de las revisiones y presentaciones de este trabajo a lo largo de su desarrollo.

Dr. Carlos Flores, gracias por su amabilidad para facilitarme sus apuntes, su tiempo y sus ideas. Mi agradecimiento al Dr. Oscar, por aceptar formar parte de mi comité y haber compartido conmigo sus observaciones. Al Dr. Jonás de Dios de Basabe Delgado por facilitarme los accesos para el uso del cluster Lamb para procesar los datos.

Finalmente, gracias a mi familia porque con ellos he compartido momentos felices que guardo en el recuerdo y son una inspiración para seguir creciendo profesionalmente. A mis amigos, que siempre me apoyaron moralmente en cada momento de esta profesión.

Sin su apoyo este trabajo nunca se habría escrito y, por eso, este trabajo es también el suyo. A todos, muchas gracias.

Tabla de contenido

| | Página |
|---|--------|
| Resumen en español | ii |
| Resumen en inglés | iii |
| Dedicatoria | iv |
| Agradecimientos | v |
| Lista de figuras | viii |
| | |
| Capítulo 1. Introducción | |
| 1.1. Justificación | 2 |
| 1.2. Hipótesis | 2 |
| 1.3. Objetivos | 3 |
| 1.3.1. Objetivo general | 3 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 3 |
| | |
| Capítulo 2. Fundamentos Teóricos | |
| 2.1. Ecuaciones de Maxwell | 4 |
| 2.2. Penetración nominal | 6 |
| 2.3. Métodos Electromagnéticos | 6 |
| 2.3.1. Método Transitorio Electromagnético (TEM) | 8 |
| 2.3.2. Efecto PI | 10 |
| 2.3.3. Método Audio-magnetotelúrico (AMT) | 12 |
| 2.4. Esquemas de Inversión 1D | 13 |
| 2.4.1. Método tipo Occam | 13 |
| 2.4.2. Método de Marquardt | 14 |
| 2.5. Esquemas de Inversión 3D | 14 |
| 2.5.1. Método de gradientes conjugados no-lineales (NLCG) | 15 |
| | |
| Capítulo 3. Zona de Estudio | |
| 3.1. Ubicación | 18 |
| 3.2. Marco Geológico | 18 |
| 3.2.1. Geología Regional | 18 |
| 3.2.2. Estratigrafía | 19 |
| 3.2.3. Geología Estructural | 22 |
| 3.3. Adquisición de datos | 22 |
| 3.3.1. Adquisición TEM | 23 |
| 3.3.2. Adquisición AMT | 24 |
| | |
| Capítulo 4. Procesamiento de datos | |
| 4.1. Procesamiento de datos TEM 1D | 25 |
| 4.2. Procesamiento de datos AMT 1D | 32 |

Tabla de contenido (continuación)

| | |
|---|----|
| Capítulo 5. Inversión de datos | |
| 5.1. Inversión de datos TEM 1D | 35 |
| 5.2. Inversión de datos AMT 1D | 45 |
| 5.3. Inversión de datos AMT 3D | 52 |
| | |
| Capítulo 6. Discusión e Interpretación de Resultados | |
| 6.1. Discusión de Resultados | 56 |
| 6.2. Interpretación de Resultados | 58 |
| | |
| Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones | |
| 7.1. Conclusiones | 62 |
| 7.2. Recomendaciones | 62 |
| | |
| Literatura citada | 64 |
| | |
| Anexo | 66 |

Lista de figuras

| Figura | Página |
|--|--------|
| 1. Principio del método electromagnético. geologiaweb | 7 |
| 2. Comportamiento geométrico de las corrientes de eddy para diferentes tiempos de un sondeo TEM. | 9 |
| 3. Comportamiento de la señal del TEM.Modificado de McNeill, 1990 | 9 |
| 4. Ejemplo de curva de decaimiento de voltaje para un sondeo TEM. | 10 |
| 5. Disposición geométrica del modelo con un solo bucle polarizable. Smith y West (1988) | 11 |
| 6. El modo de corriente intrínseca que fluye en un circuito no polarizable y la respuesta de voltaje inducida asociada. | 11 |
| 7. Localización de la zona de estudio. Mapa creado en ArcGIS | 18 |
| 8. Geología regional de la zona de estudio. Imagen Tomada del informe 2020 CONAGUA. | 19 |
| 9. Distribución de sondeos de AMT y TEM propuestos. Figura creada en Google Earth. | 22 |
| 10. a) Arreglo de bobina central. b) Forma de la corriente inyectada en la espira transmisora del sistema Geonics. c) Voltajes primario y secundario inducidos en la bobina receptora. Localización de las ventanas de medición del voltaje en los dos lapsos de de corriente. (Flores Luna, 2018) . . . | 23 |
| 11. a) Configuración en campo AMT. b) Distribución del dipolos eléctricos y bobinas. | 24 |
| 12. Panel de datos extraídos del sistema Geonics TEM 57. | 25 |
| 13. Panel de datos promediados | 26 |
| 14. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 1 pertenecientes al Perfil A. | 27 |
| 15. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 4 pertenecientes al Perfil A. | 27 |
| 16. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 5 pertenecientes al Perfil A. | 28 |
| 17. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 8 pertenecientes al Perfil A. | 28 |
| 18. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 2 pertenecientes al Perfil B | 29 |
| 19. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 3 pertenecientes al Perfil B | 29 |
| 20. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 6 pertenecientes al Perfil B | 30 |

Lista de figuras (continuación)

| Figura | Página |
|---|--------|
| 21. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 7 pertenecientes al Perfil B | 30 |
| 22. Parámetros Cole-Cole utilizados en el panel de entrada del programa TRIM. (Flores Luna, 2000) | 32 |
| 23. Curvas de resistividad aparente, fase y coherencia de los sondeos AMT del Perfil A. | 33 |
| 24. Curvas de resistividad aparente, fase y coherencia de los sondeos AMT del Perfil B. | 33 |
| 25. Curvas de resistividad aparente para la componente rhoxy, rhoyx y el determinante del Perfil A. | 34 |
| 26. Curvas de resistividad aparente para la componente rhoxy, rhoyx y el determinante del Perfil B. | 34 |
| 27. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 1 del Perfil A. | 36 |
| 28. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 5 del Perfil A. | 37 |
| 29. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 4 del Perfil A. | 37 |
| 30. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 8 del Perfil A. | 38 |
| 31. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 2 del Perfil B. | 38 |
| 32. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 3 del Perfil B. | 39 |
| 33. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 6 del Perfil B. | 39 |
| 34. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 7 del Perfil B. | 40 |
| 35. Modelo 1D del sondeo TEM 1 para el Perfil A. | 40 |
| 36. Modelo 1D del sondeo TEM 5 para el Perfil A. | 41 |
| 37. Modelo 1D del sondeo TEM 4 para el Perfil A. | 41 |
| 38. Modelo 1D del sondeo TEM 8 para el Perfil A. | 42 |
| 39. Modelo 1D del sondeo TEM 2 para el Perfil B. | 42 |
| 40. Modelo 1D del sondeo TEM 6 para el Perfil B. | 43 |
| 41. Modelo 1D del sondeo TEM 3 para el Perfil B. | 43 |
| 42. Modelo 1D del sondeo TEM 7 para el Perfil B. | 44 |
| 43. Resultados de inversión 1D para sondeos AMT 1 y 4 del Perfil A. | 46 |
| 44. Resultados de inversión 1D para sondeos AMT 5 y 8 del Perfil A. | 46 |

Lista de figuras (continuación)

| Figura | Página |
|--|--------|
| 45. Resultados de inversión 1D para sondeos AMT 2 y 3 del Perfil B. | 47 |
| 46. Resultados de inversión 1D para sondeos AMT 6 y 7 del Perfil B. | 47 |
| 47. Modelo Sintético del sondeo AMT 1 para el Perfil A. | 48 |
| 48. Modelo Sintético del sondeo AMT 4 para el Perfil A. | 49 |
| 49. Modelo Sintético del sondeo AMT 5 para el Perfil A. | 49 |
| 50. Modelo Sintético del sondeo AMT 8 para el Perfil A. | 50 |
| 51. Modelo Sintético del sondeo AMT 2 para el Perfil B. | 50 |
| 52. Modelo Sintético del sondeo AMT 3 para el Perfil B. | 51 |
| 53. Modelo Sintético del sondeo AMT 6 para el Perfil B. | 51 |
| 54. Modelo Sintético del sondeo AMT 7 para el Perfil B. | 52 |
| 55. Resultados de las inversiones a partir de los modelos iniciales para el perfil A. | 53 |
| 56. Resultados de las inversiones a partir de los modelos iniciales para el perfil B. | 53 |
| 57. Modelo final. | 54 |
| 58. ajustes finales sitio 4 y 5. | 55 |
| 59. Modelo Óptimo para el Perfil A y B. | 57 |
| 60. Modelo digital de elevación de Ensenada, Baja California. Elaboración propia https://skfb.ly/o6YzW | 58 |
| 61. Perspectivas del modelo digital de elevación de Ensenada, Baja California. Elaboración propia https://skfb.ly/o6YzW | 59 |
| 62. Modelo geológico para el Perfil A. | 60 |
| 63. Modelo geológico para el Perfil B. | 61 |
| 64. Modelo geológico propuesto. | 63 |
| 65. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 1. a) muestra el ajuste para el modelo a priori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primer capa. | 66 |
| 66. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 2. a) muestra el ajuste para el modelo a priori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primer capa. | 66 |

Lista de figuras (continuación)

| Figura | Página |
|--|--------|
| 67. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 3. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa. | 67 |
| 68. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 4. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa. | 67 |
| 69. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 5. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa. | 67 |
| 70. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 6. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa. | 68 |
| 71. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 7. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa. | 68 |
| 72. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 8. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa. | 68 |
| 73. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 1. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras. | 69 |
| 74. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 2. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras. | 69 |
| 75. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 3. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras. | 70 |
| 76. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 4. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras. | 70 |

Lista de figuras (continuación)

| Figura | Página |
|--|--------|
| 77. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 5. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras. | 70 |
| 78. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 6. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras. | 71 |
| 79. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 7. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras. | 71 |
| 80. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 8. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras. | 71 |
| 81. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 1. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas. | 72 |
| 82. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 2. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas. | 72 |
| 83. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 3. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas. | 73 |
| 84. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 4. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas. | 73 |

Lista de figuras (continuación)

| Figura | Página |
|--|--------|
| 85. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 5. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas. | 73 |
| 86. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 6. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas. | 74 |
| 87. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 7. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas. | 74 |
| 88. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 8. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas. | 74 |
| 89. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 1. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. | 75 |
| 90. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 2. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. | 75 |
| 91. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 3. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. | 76 |
| 92. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 4. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. | 76 |

Lista de figuras (continuación)

| Figura | Página |
|--|--------|
| 93. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 5. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. | 76 |
| 94. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 6. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. | 77 |
| 95. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 7. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. | 77 |
| 96. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 8. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. | 77 |
| 97. Ajuste final para el sitio 1 y 2. | 78 |
| 98. Ajuste final para el sitio 3 y 6. | 78 |
| 99. Ajuste final para el sitio 7 y 8. | 78 |

Capítulo 1. Introducción

Desde el espacio, cualquier imagen de nuestro planeta muestra que la Tierra es un planeta azul, debido a que el 70 % de su superficie está cubierta por agua. De ese 70 % tan solo el 2.5 % es agua dulce y casi el 30 % de esa agua dulce son aguas subterráneas de difícil acceso. Las aguas subterráneas abastecen de agua potable por lo menos al 50 % de la población mundial y representan el 43 % de toda el agua utilizada para el riego. Alrededor de 2,500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos de aguas subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas diarias de agua. Se estima que el 20 % de los acuíferos mundiales están teniendo una explotación intensiva, lo que tendrá consecuencias graves, como el hundimiento del suelo y la intrusión de agua salina. De acuerdo a un informe presentado por la CONAGUA en 2020, México cuenta con 653 acuíferos para la administración de aguas subterráneas, los cuales aportan el 39 % del volumen para usos consuntivos. Del total de acuíferos, 115 se encuentra en condición de explotación intensiva, 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 con intrusión salina.

Particularmente, el municipio de Ensenada, en Baja California, México; sufre hoy en día una de las mayores crisis de abastecimiento de agua en los hogares, debido al crecimiento de su población y a la explotación intensiva de agua que el crecimiento conlleva.

Tomando en cuenta la demanda de agua de la población (gasto promedio en l/s), Ensenada tiene escasez desde 2006. En 2014 se agudizó el problema al presentarse un déficit de 177 l/s; esto es, mientras la ciudad requería 890 l/s, el organismo operador (CESPE), sólo podía proporcionar 713 l/s. La Comisión Estatal del Agua (CEA) estableció en un foro organizado por el Colegio de Ingenieros Civiles de Mexicali en septiembre de 2014, que a mediano plazo (2020) Ensenada tendrá una demanda de 1,014 l/s, y de 1,294 l/s en el largo plazo (2030).

El acuífero Maneadero, definido con la clave 0212 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, es uno de los acuíferos pertenecientes al municipio de Ensenada. Se clasifica como zona de disponibilidad 1, es decir, el principal usuario es el agrícola. De acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (REPD), para julio de 2013 existían 396 apro-

vechamientos, de los cuales 293 son pozos, 94 norias y 9 manantiales. Del total de obras, que en conjunto extraen un volumen de 38.6 hm^3 anuales, de los cuales 26.2 hm^3 (67.9%) son para uso agrícola, 11.7 hm^3 (30.3%) uso público urbano, 0.4 hm^3 para uso industrial, 0.2 hm^3 (0.5%) para uso industrial y 0.1 hm^3 (0.3%) para uso doméstico. Resulta evidente pensar que el municipio de Ensenada seguirá incrementando su demanda de agua; por tal motivo; es necesario considerar nuevas fuentes de abastecimiento. En casos como estos, los métodos geofísicos juegan un papel importante. Una de las técnicas utilizadas para la exploración del agua subterránea son los métodos electromagnéticos, con los cuales se puede inferir la distribución de resistividades en el subsuelo. De esta manera, los modelos geoeléctricos pueden ser correlacionados con las unidades hidrogeológicas. (McNiell, 1990; Vozoff, 1991).

1.1. Justificación

El último informe publicado por la CONAGUA en 2020 muestra que el acuífero de Maneadero cuenta con 33.8 hm^3 de recarga, mientras que su demanda de extracción es de 38.52 hm^3 , lo cual conlleva a un 0% de disponibilidad. La cantidad de salida total de agua es mayor a la cantidad de entrada.

Por lo tanto, el propósito de este trabajo es explorar y caracterizar geoeléctricamente un sector del acuífero de Maneadero mediante la aplicación de dos técnicas geofísicas con el fin de recopilar información hidrológica mediante la aplicación de métodos electromagnéticos.

1.2. Hipótesis

- Los métodos electromagnéticos permitirán explorar y caracterizar la zona de estudio y así recopilar información hidrológica que contribuya a satisfacer la demanda del recurso hídrico en un futuro.
- Mediante la inclusión de la información obtenida con los datos TEM se podrá mejorar el resultado de la inversión 3D de datos AMT.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Explorar y caracterizar el sitio de estudio mediante la aplicación de métodos electromagnéticos (TEM y AMT).

1.3.2. Objetivos específicos

- Obtener modelos geoelectricos a partir de la aplicación de algoritmos de inversión para datos TEM y AMT en 1D.
- Obtener un modelo geoelectrico tridimensional a partir de la inversión de datos AMT.
- Correlacionar los modelos geoelectricos con unidades hidrogeológicas de la zona de estudio.

Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

En el presente capítulo se describen los principios teóricos que rigen a los métodos electromagnéticos y se muestran los fundamentos para el método Transitorio Electro-magnético (TEM) y el método Audio-magnetotelúrico (AMT) empleados en la inversión 1D y 3D.

2.1. Ecuaciones de Maxwell

El físico británico James Clerk Maxwell (1831-1879) fue quien unificó el conocimiento que se tenía en esa época de las leyes de la electricidad y del magnetismo, en un grupo de ecuaciones diferenciales parciales que describen la interacción entre el campo eléctrico \mathbf{E} y campo magnético \mathbf{H} , mostradas a continuación:

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \Omega, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

donde \mathbf{D} representa el desplazamiento eléctrico en C/m^2 , \mathbf{B} la densidad de flujo magnético en teslas (T), \mathbf{J} la densidad de corriente en A/m^2 y Ω la densidad de carga en C/m^3 .

En un medio isotrópico simple \mathbf{D} , \mathbf{B} y \mathbf{J} se encuentran relacionadas con \mathbf{E} y \mathbf{H} de acuerdo a las relaciones constitutivas dadas como:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

donde ϵ , μ y σ representan la permitividad (F/m), la permeabilidad magnética (H/m) y la conductividad eléctrica (Siemens/m) respectiva del medio. Suponiendo que no hay cargas libres en el medio y aplicando las relaciones anteriores, las ecuaciones obtenidas por Maxwell se reducen a lo siguiente:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (8)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}, \quad (9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0, \quad (11)$$

Sea $i = \sqrt{-1}$ y $\omega = 2\pi f$ (rad/s) la frecuencia angular, si ahora relacionamos todas las expresiones anteriormente descritas, y además asumimos que \mathbf{E} y \mathbf{H} presentan una dependencia con el tiempo de la forma:

$$H(t) = H_0 e^{i\omega t} \quad (12)$$

$$E(t) = E_0 e^{i\omega t} \quad (13)$$

se obtiene que las ecuaciones básicas que describen la propagación eléctrica y

magnética en un medio isótropo, lineal y homogéneo son:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = i\omega\mu\sigma\mathbf{H} - \varepsilon\mu\omega^2\mathbf{H} \quad (14)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = i\omega\mu\sigma\mathbf{E} - \varepsilon\mu\omega^2\mathbf{E} \quad (15)$$

2.2. Penetración nominal

La profundidad de penetración de los campos electromagnéticos en la tierra está inversamente relacionada con la conductividad de la roca y con la frecuencia. En un semiespacio uniforme, \mathbf{E} y \mathbf{H} decaen exponencialmente con la profundidad: entre más conductivo sea el subsuelo menor será la profundidad de penetración. La profundidad a la cual la onda electromagnética reduce su amplitud por un factor $e^{-1} \sim 0.368$ de su valor en superficie se le denomina '**skin depth**' y está dada por la siguiente ecuación (Vozzof, 1972):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0\sigma\omega}} \quad (16)$$

donde μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío, σ es la conductividad eléctrica, $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular y f la frecuencia en hertz. De tal manera que, a mayores frecuencias menor profundidad de investigación, y a menores frecuencias mayor profundidad de investigación.

2.3. Métodos Electromagnéticos

Los métodos electromagnéticos (EM) se basan en el estudio del subsuelo a través de los cambios en las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales que lo componen. Los métodos EM pueden ser de campo natural o artificial, van de bajas a

altas frecuencias alcanzando varios kilómetros de profundidad. La información recopilada puede ser procesada e interpretada en 1D, 2D o 3D, esto dependerá del objetivo de estudio.

El método electromagnético (EM) hace uso de la respuesta del suelo a la difusión de campos electromagnéticos. Los campos electromagnéticos primarios pueden generarse pasando una corriente alterna a través de una bobina pequeña, formada por muchas vueltas de alambre, o a través de un bucle grande de alambre. La respuesta del suelo es la generación de campos electromagnéticos secundarios, y los campos resultantes pueden ser detectados por corrientes alternas que fluyen en una bobina receptora por el proceso de inducción electromagnética. El campo electromagnético primario viaja desde la bobina transmisora a la bobina receptora a través de trayectorias tanto por encima como por debajo de la superficie. Cuando el subsuelo es homogéneo, la diferencia entre los campos propagados es mínima por encima de la superficie y a través del suelo, excepto por una ligera reducción en la amplitud de las segundas con respecto a las primeras. Sin embargo, en presencia de un cuerpo conductor, el componente magnético del campo electromagnético que penetra en el suelo induce corrientes alternas, o corrientes de Foucault, para que fluyan en el conductor (Fig. 1).

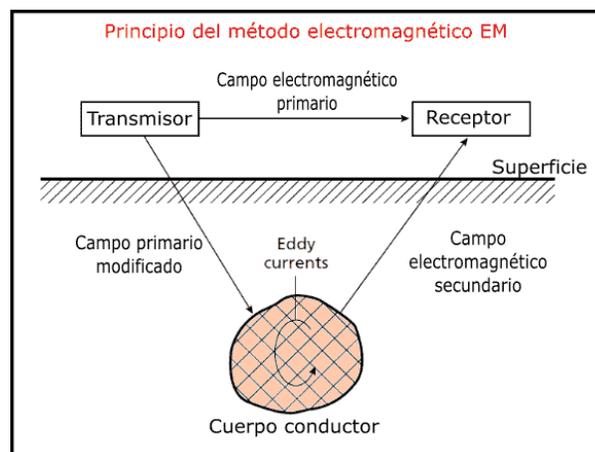


Figura 1. Principio del método electromagnético. geologiaweb

Las corrientes de Foucault generan su propio campo electromagnético secundario que viaja al receptor. El receptor responde a la resultante de los campos primarios y secundarios que llegan, de modo que la respuesta difiere tanto en la fase como en la amplitud de la respuesta al campo primario solo. Estas diferencias entre los campos electromagnéticos transmitidos y recibidos revelan la presencia del conductor y

proporcionan información sobre su geometría y propiedades eléctricas. La inducción electromagnética tiene lugar tanto en el vacío como en un medio conductor y no requiere de contacto físico del transmisor o del receptor con el suelo. La adquisición en superficie del método electromagnético EM pueden proceder mucho más rápidamente que los sondeos eléctricos, donde se requiere contacto galvánico con el suelo.

2.3.1. Método Transitorio Electromagnético (TEM)

Las técnicas electromagnéticas de exploración geofísica se utilizan cada vez más para estimar la resistividad del subsuelo, como una alternativa a los de corriente directa. Las técnicas electromagnéticas pueden ser divididas en dos grupos: en el dominio de la frecuencia y en el dominio tiempo. El sondeo electromagnético transitorio, comúnmente conocidos como sondeo TEM o TDEM (Transient Electromagnetic, Time Domain Electromagnetic), es una técnica usada en diversas aplicaciones (geohidrología, minería, geotermia, etc.).

El objetivo principal del método electromagnético TEM es mostrar la distribución de la resistividad del subsuelo; siendo que es una técnica con gran resolución vertical, es posible obtener una imagen lo más real posible de las condiciones del subsuelo. En general, la técnica del TEM consiste en construir una espira con un cable en forma de cuadrado, por la que se deja pasar una corriente continua de gran intensidad que crea un campo magnético primario; después de cierto tiempo se interrumpe abruptamente el flujo de corriente y el campo magnético primario colapsa. Así, corrientes de eddy son inducidas en el subsuelo, las cuales originan un campo magnético secundario (Figura 2). La tasa de cambio de este campo magnético secundario es medida como voltaje inducido en una bobina receptora. La forma del decaimiento de este voltaje contiene información sobre la distribución de la resistividad del terreno debido a que la magnitud y la distribución de la corriente inducida dependen de él.

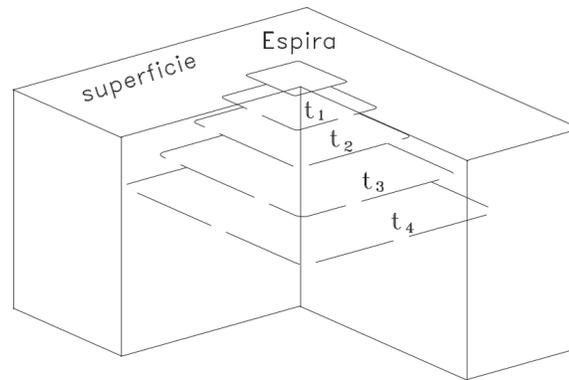


Figura 2. Comportamiento geométrico de las corrientes de eddy para diferentes tiempos de un sondeo TEM.

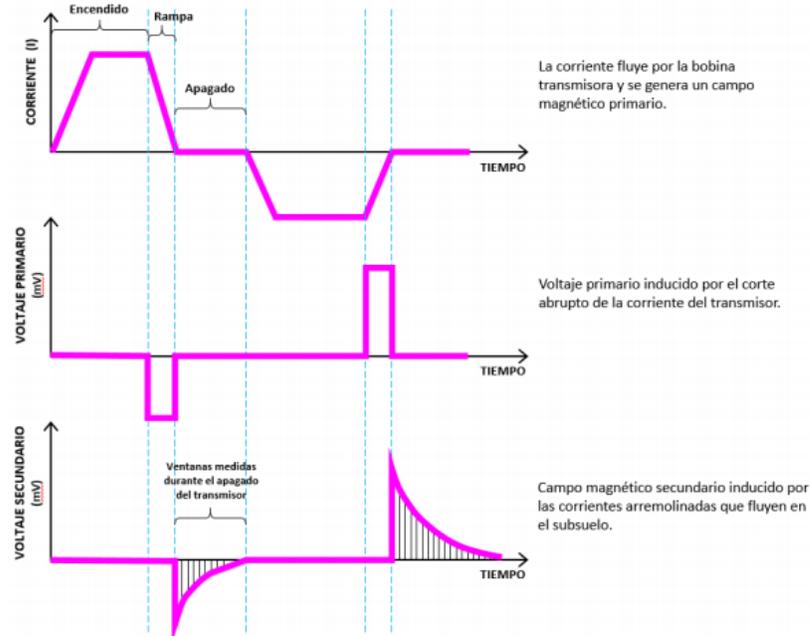


Figura 3. Comportamiento de la señal del TEM. Modificado de McNeill, 1990

El método TEM es una técnica geofísica frecuentemente utilizada para el estudio y caracterización de acuíferos, donde la profundidad de investigación depende principalmente de los valores de resistividad del terreno, terrenos resistivos tendrán mayor penetración que terrenos conductores. Además, la profundidad de investigación dependerá de la amplitud de la señal, la cual es directamente proporcional al tamaño del loop y a la intensidad de la corriente eléctrica.

Los resultados obtenidos comúnmente son mostrados como curvas de decaimiento, es decir, curvas de voltaje contra tiempo (Figura 4). A partir de estas curvas, que mediante algoritmos de inversión 1D, se pueden obtener modelos de la variación de la resistividad en función de la profundidad.

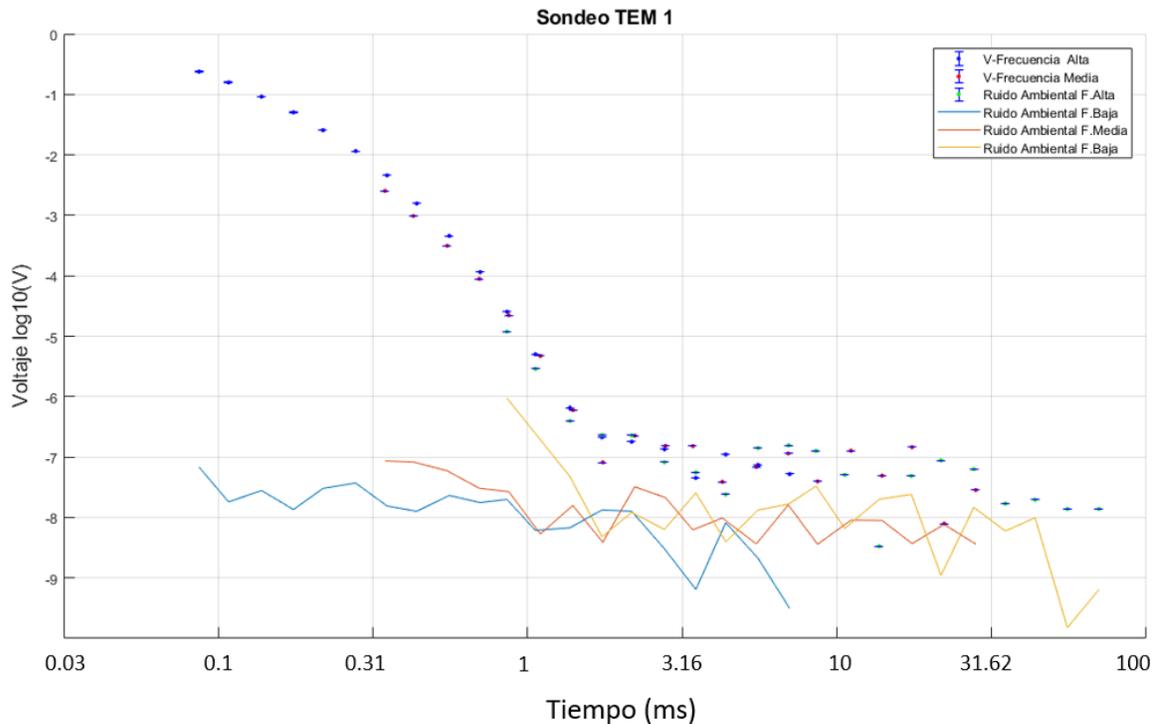


Figura 4. Ejemplo de curva de decaimiento de voltaje para un sondeo TEM.

2.3.2. Efecto PI

A menudo cuando se emplea el método de bucle coincidente, la respuesta ocasionalmente cambia de signo en tiempos tardíos. Se infiere que el mecanismo que causa los negativos es una dependencia de la conductividad con la frecuencia (dispersión). Para obtener valores negativos, la conductividad debe aumentar con la frecuencia sobre el rango espectral cubierto por el sondeo TEM (10 – 1000 Hz). (Smith y West, 1988)

La Figura 5 muestra un modelo propuesto por Smith y West (1988), el cual consiste en una bobina enterrada que simula un cuerpo tabular mineralizado que tiene PI. El medio encajonante es de muy alta resistividad, tal que la corriente inducida solo puede

circular en la bobina enterrada. La corriente en el transmisor (Tx) es un escalón de intensidad i_0 . La bobina enterrada está caracterizada por una autoinductancia L_1 , una resistencia R_0 y un efecto de PI simulado con una capacitancia y otra resistencia R_1 , k_{01} es el factor de acoplamiento entre el Tx, y el receptor (Rx), que depende de las distancias entre ellos y de sus orientaciones.

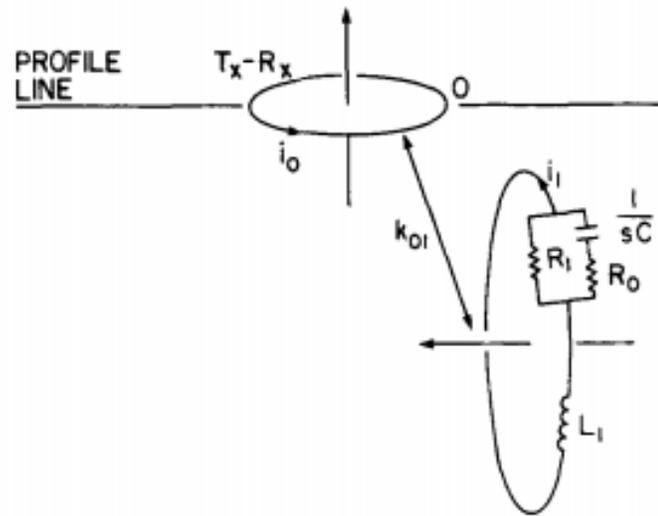


Figura 5. Disposición geométrica del modelo con un solo bucle polarizable. Smith y West (1988)

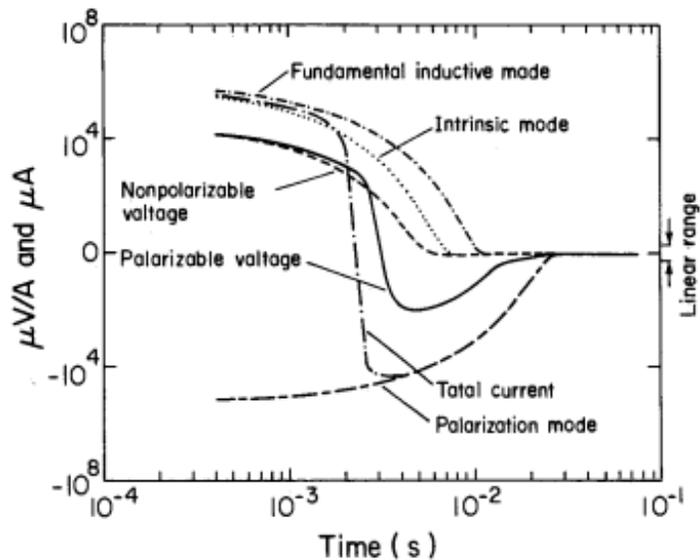


Figura 6. El modo de corriente intrínseca que fluye en un circuito no polarizable y la respuesta de voltaje inducida asociada.

Analizando los voltajes y corrientes del circuito, ellos encontraron el comportamiento en tiempo de las corrientes en la bobina, sin y con PI, y los voltajes que se medirían en la espira receptora. En la Figura 6 podemos observar que cuando no hay PI, la corriente ("corriente sin PI") es positiva, y el voltaje medido ("voltaje sin PI") también es positivo para todos los tiempos. En cambio, cuando la bobina enterrada sí tiene PI, hay dos corrientes simultáneas en ella pero de polaridad opuesta: la corriente inductiva fundamental, que es positiva y parecida a la corriente sin PI, y la corriente de polarización que es negativa todo el tiempo. Estas dos corrientes tienen tasas de decaimiento diferentes. En algunas ocasiones, la corriente inductiva fundamental decae más rápido que la corriente de polarización; esto ocasiona que en tiempos largos la corriente de polarización pueda ser más intensa y por lo tanto, la corriente total de ser positiva en tiempos cortos, cambie a negativa en tiempos largos. Este comportamiento de la corriente total es la que puede producir el cambio de signo en los voltajes medidos en el receptor. Para llevar a cabo el procesamiento de los datos con PI es necesario considerar los parámetros de Cole-Cole, es decir, se consideran valores de cargabilidad (m), constante de tiempo (τ), resistividad de frecuencia cero (ρ_0) y el espesor de la capa (z).

2.3.3. Método Audio-magnetotelégrafo (AMT)

El método Magnetotelégrafo (MT) es una técnica pasiva de los métodos electromagnéticos, fue desarrollado en la década de los 50's por Thikhonov (1950) y Cagniard (1953), quienes plantearon la posibilidad de usar el campo electromagnético de la Tierra para estudiar las características de la corteza terrestre. A partir de las ecuaciones de Maxwell se relacionan los campos eléctricos y campos magnéticos (Thikhonov, 1950). Cagniard (1953) describió con más detalle el método, mencionando fuentes, aplicaciones y solución al problema de varias capas.

Este método consiste en medir las variaciones temporales de los campos eléctricos y magnéticos de la Tierra; son medidos en superficie de forma simultánea, en un rango determinado de frecuencias para estimar la distribución de la conductividad eléctrica en el subsuelo.

El MT puede alcanzar decenas de kilómetros de profundidad, utilizando frecuencias en la banda de 0.001 a 100 Hz (Vozzof, 1991).

El campo electromagnético proviene de fuentes naturales externas que inducen campos secundarios en el subsuelo. La interacción de las partículas del viento solar con magnetósfera e ionósfera, generan corrientes eléctricas que a su vez originan campos magnéticos en un rango de frecuencias menores a 1 Hz. Asimismo, para frecuencias mayores a 1 Hz, los campos electromagnéticos se originan debido a la actividad meteorológica; es decir, la propagación de energía electromagnética debido a tormentas eléctricas a escala global (Vozzof, 1972).

El método AMT, el cual será aplicado en el presente proyecto, es una extensión del método MT; se basa en los mismos principios físicos, pero utiliza un rango de frecuencias de 10 Hz a 100 kHz, es decir, la profundidad de penetración cubre desde algunas decenas de metros hasta cientos de metros, aproximadamente 500 m, dependiendo la resistividad del subsuelo.

2.4. Esquemas de Inversión 1D

La generación de imágenes de AMT es un proceso de etapas múltiples en el cual la resistividad aparente y fase son utilizadas en la inversión para ilustrar cambios en resistividad asociados con la geología. Los esquemas de inversión son utilizados para convertir los datos a una variación de la resistividad con la profundidad. El proceso considera los datos adquiridos de AMT, los cuales son matemáticamente invertidos y se determina la ubicación, tamaño y profundidad probable de la fuente los cuales provocan variaciones en la resistividad del subsuelo.

2.4.1. Método tipo Occam

Este método de inversión para datos electromagnéticos fue desarrollado por Constable et al. (1987). El método de inversión tipo Occam propone encontrar el modelo más suave que ajuste los datos y sea el más simple dentro de una tolerancia razonable. La actualización del modelo está dada por

$$\Delta m_k = (J^T W_d^2 J + \lambda R_{1,2}^T R_{1,2})^{-1} [J^T W_d^2 (d - F(m_k)) - \lambda R_{1,2}^T R_{1,2} m_k] \quad (17)$$

donde W_d es una matriz de peso que contiene los errores de los datos medidos, J es la matriz jacobiana, Δm_k es la actualización del modelo, $F(m_k)$ es la respuesta del modelado directo, λ es un parámetro de regularización, R_1 y R_2 son restricciones en forma de rugosidad definidas por la primera y segunda derivada de la resistividad con respecto a la profundidad (Ruiz, 2018).

2.4.2. Método de Marquardt

Es un método de inversión que depende en gran medida de la elección del modelo inicial (Ruiz, 2018), el cual utiliza una cantidad mínima de parámetros del modelo. Este método es conocido como Marquardt-Levenberg o Damped Least Squares y la actualización del modelo (Δm_k) está definido por la ecuación (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963) :

$$\Delta m_k = (J^T W_d^2 J + \beta^2 I)^{-1} J^T W_d^2 (d - F(m_k)) \quad (18)$$

Donde I es la matriz identidad, β es el multiplicador de Lagrange, W_d es una matriz de peso que contiene los errores de los datos medidos, $F(m_k)$ es el operador de modelado directo, J es la matriz del Jacobiano que describe la sensibilidad de los datos con respecto a una pequeña perturbación en los parámetros del modelo.

2.5. Esquemas de Inversión 3D

En el caso 3D, la conductividad de la tierra varía en tres direcciones $\sigma(x, y, z)$. La solución de las ecuaciones de Maxwell en 3D es numérica y se obtiene mediante (Egbert y Kelbert, 2012):

$$\nabla \times \nabla \times E + i\omega\mu\sigma E = 0 \quad (19)$$

o en términos del campo magnético (Egbert y Kelbert, 2012):

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times H + i\omega\mu H = 0 \quad (20)$$

La solución de estas ecuaciones es obtenida para las tres componentes del campo **E** y **H** respectivamente, a partir de la técnica de diferencias finitas sobre una malla escalonada 3D. Lo anterior conduce a la formación de un sistema de ecuaciones de la forma:

$$S_m e = b \quad (21)$$

donde el subfijo m representa la dependencia del operador de diferencias finitas con un parámetro específico del modelo, e representa la solución discreta de los campos electromagnéticos y b representa las condiciones de frontera.

El método de inversión implementado en el algoritmo ModEM (Kelbert et al., 2014) está basado en la minimización de la función de costo:

$$\phi = (d - d')^T C_d^{-1} (d - d') + \lambda (m)^T C_m^{-1} (m - m_o) \quad (22)$$

Donde d son los datos observados, d' los datos calculados. Los errores en los datos están contenidos en la matriz de covarianza C_d , m son los parámetros del modelo y m_o contiene los parámetros del modelo inicial. λ es el parámetro de regularización, y C_m es la matriz de covarianza de los parámetros del modelo.

2.5.1. Método de gradientes conjugados no-lineales (NLCG)

De acuerdo con Rodi y Mackie (2001), el algoritmo para minimizar ϕ se basa en los gradientes conjugados no lineales que resuelven directamente problemas de minimización que no son cuadráticos, dejando el marco iterativo de la inversión linealizada. El algoritmo NLCG utiliza la técnica Polak-Ribiere de los gradientes conjugados no lineales para minimizar la función objetivo. El problema de linealización planteado no es cuadrático y requiere de una técnica iterativa para resolverse. La línea del algoritmo de búsqueda es una versión univariante del método Gauss-Newton con algunas modificaciones (Rodi y Mackie, 2001).

La expresión que determina el gradiente de la función objetivo ($\phi = \phi_d + \lambda\phi_m$) está dada por:

$$\nabla\phi = \nabla\phi_d + \lambda\nabla\phi_m \quad (23)$$

donde las funciones ϕ_d y ϕ_m relacionan el desajuste de los datos con la restricción de la suavidad del modelo, respectivamente. La función $\phi_m = \|Lm^2\|$, entonces:

$$\nabla\phi_m = 2L^T L_m \quad (24)$$

En el método de NLCG, el objetivo también es minimizar el desajuste de los datos calculados, mediante una función de costo o de desajuste.

$$\phi_d = (d - d')^T W_d^2 (d - d') = \epsilon^T W_d^2 \epsilon \quad (25)$$

por lo tanto, el gradiente de la función anterior, se reescribe de la siguiente manera:

$$\phi_d = -2J^T W_d^2 (d - d') \quad (26)$$

Entonces, el método de NLCG, minimiza la función de costo ϕ pero con respecto a β . La expresión siguiente muestra el problema de minimización:

$$\phi(m_k + \beta_k p_k) = \min_{\beta} \phi(m_k + \beta_k p_k) \quad (27)$$

El enfoque de NLCG genera una secuencia de modelos, los cuales se determinan:

$$m_{k,j} = m_k + \beta_{k,j} p_k \quad (28)$$

donde el β se define así:

$$\beta_{k,0} = 0 \quad (29)$$

$$\beta_{k,j+1} = \beta_{k,j} - \frac{g_{k,j}^T p_k}{p_k^T \hat{H}_{kj} p_k} \quad (30)$$

El vector g es el gradiente que esta representado por $g = -2J^T W_d^2 (d-d') + 2\lambda L^T L_m \cdot \hat{H}$ es la matriz aproximada de Hessian ($\hat{H} = 2J^T W_d^2 J + 2\lambda L^T L$). p_k representa la dirección del gradiente que está determinada por la dirección del descenso más pronunciada:

$$p_0 = -C_0 g_0 \quad (31)$$

$$p_k = -C_k g_k + \gamma_k p_{k-1} \quad (32)$$

El término γ_k se estima aplicando la técnica de Polark-Ribiere:

$$\gamma_k = \frac{g_k^T C_k (g_k - g_{k-1})}{g_{k-1}^T C_{k-1} g_{k-1}} \quad (33)$$

Entonces, el preconditionador C_m está definido por:

$$C_k = (\eta_k I + \lambda L^T L)^{-1} \quad (34)$$

donde η_k es un escalar definido. El algoritmo de NLCG por lo tanto realiza un seguimiento del mejor modelo (*mej*) encontrado en la búsqueda:

$$m_{k,mej} = m_k + \beta_{k,mej} g_k \quad (35)$$

De tal forma que el resultado final de la k-ésima búsqueda se toma como el mejor modelo encontrado:

$$m_{k+1} = m_{k,mej} \quad (36)$$

Capítulo 3. Zona de Estudio

3.1. Ubicación

La zona de estudio está localizada en la zona noroeste del estado de Baja California, en el límite norte del acuífero Maneadero, aproximadamente 6 km al sur del centro de la ciudad de Ensenada, las coordenadas geográficas 31°48' latitud Norte y 116°34' longitud Oeste. Se trata de una depresión natural que cubre un área de 75,054 m² y su principal vía de acceso es la avenida Hierro (Figura 7).

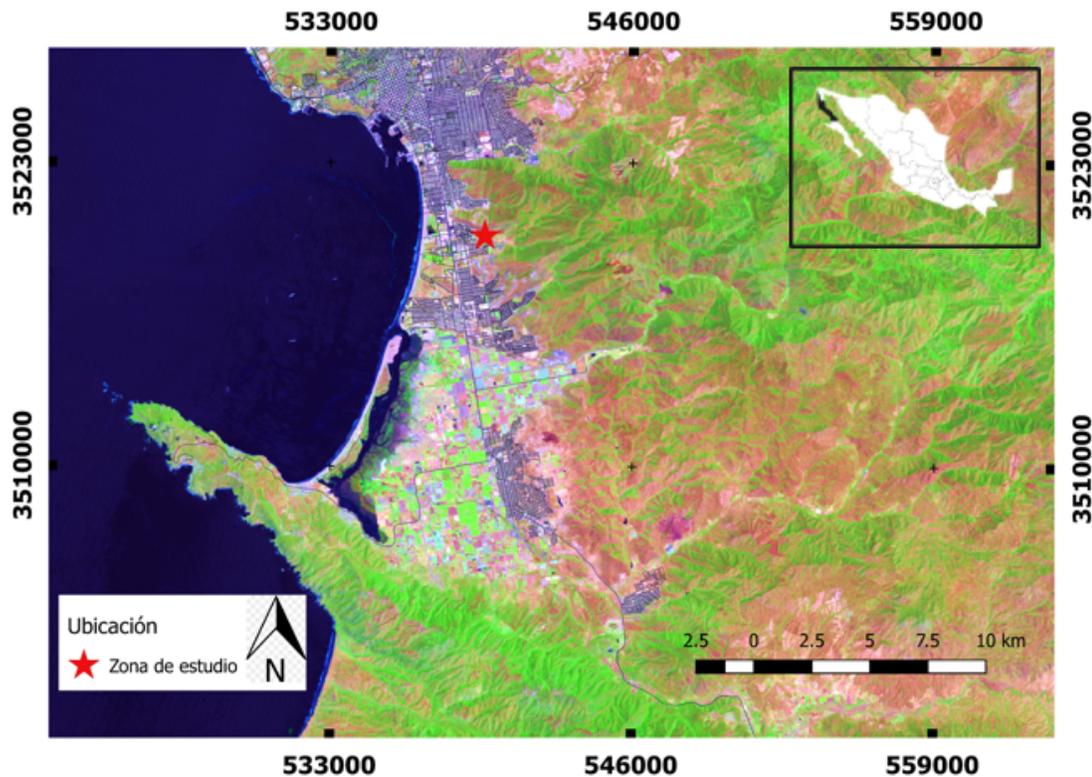


Figura 7. Localización de la zona de estudio. Mapa creado en ArcGIS

3.2. Marco Geológico

3.2.1. Geología Regional

El acuífero de Maneadero se encuentra constituido, en su porción superior, por depósitos clásticos de origen aluvial, fluvial, eólicos y palustres de granulometría variada, conglomerados y areniscas depositados en los cauces de los arroyos San Carlos

y San Francisquito y en la planicie costera; en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas, sedimentarias y vulcanoclásticas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración. Las fronteras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas y vulcanosedimentarias (Formación Alisitos), así como por las rocas intrusivas y metasedimentarias. El espesor de los depósitos clásticos es de 20 a 80 m, en tanto que el medio fracturado puede alcanzar algunas decenas de metros (Santillán y Barrera 1930).

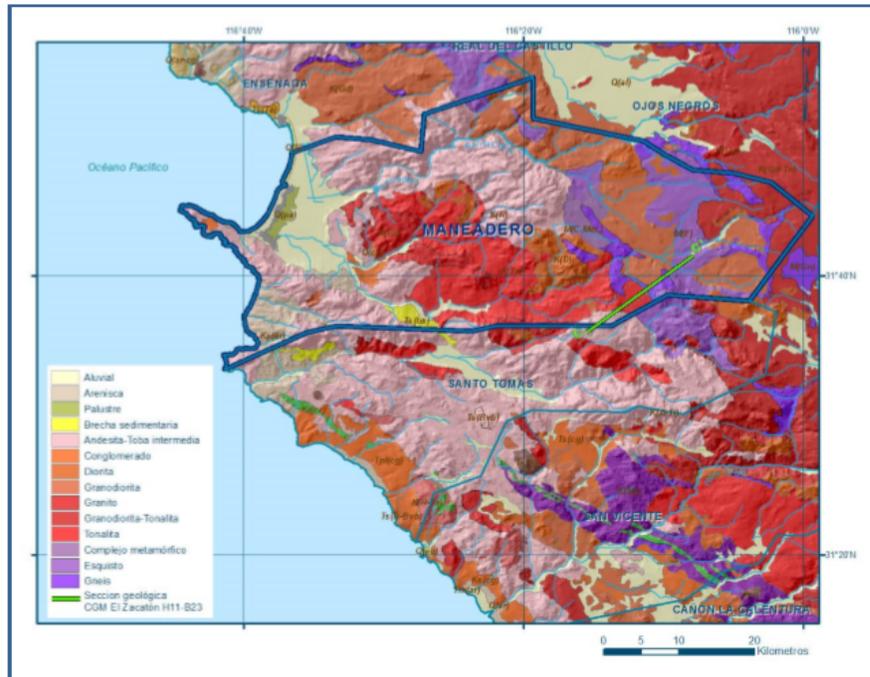


Figura 8. Geología regional de la zona de estudio. Imagen Tomada del informe 2020 CONAGUA.

3.2.2. Estratigrafía

En el área del acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas y metasedimentarias cuyo registro estratigráfico varía del Mesozoico (Triásico) al Reciente. En la porción occidental del acuífero afloran rocas ígneas intrusivas como granitos y granodioritas, consideradas parte de la Franja Batolítica Transpeninsular, a la cual se le atribuye una edad Cretácico Superior. Sobre estas rocas sobreyace una serie de derrames de composición basáltica y un grupo de rocas andesíticas. A continuación se hace una breve descripción de las unidades geológicas que afloran en el área, de la más antigua a la más reciente:

Mesozoico

Triásico-Jurásico

Las rocas más antiguas están representadas por metasedimentos y una alternancia de esquistos y gneises de posible edad Triásico Superior-Jurásico Medio que afloran como techos colgantes en rocas graníticas. Aflora, también, una secuencia compuesta por andesitas, brechas andesíticas y rocas metavolcánicas con bajo grado de metamorfismo en facies de esquistos verdes. Aunque esta unidad no contiene depósitos de calizas, se correlaciona litológicamente con parte de la Formación Santiago Peak, que aflora desde las montañas de Santa Ana, en el sur de California, hasta la Falla Agua Blanca en Baja California.

Cretácico Formación Alisitos

(Cretácico Inferior)

Fue definida formalmente por Santillán y Barrera (1930), al referirse a “una secuencia de 200 m de lutitas y areniscas metamorfoseadas del Cretácico Inferior que aflora en el Rancho Alisitos en el Valle de Santo Tomás, en el Estado de Baja California. Esta unidad se extiende en una franja orientada NW-SE por espacio de 500 km de largo y 50 km de ancho (Almazán, 1988), a lo largo de la cual, debido a su naturaleza, presenta frecuentes variaciones horizontales”. Consta de nueve miembros litológicos: dos inferiores de composición volcánica, tres intermedios de rocas sedimentarias con fauna fósil del Albiano Medio o Aptiano y cuatro superiores de clásticos gruesos de origen volcánico que se localizan al este-noreste de El Rosario, Baja California, que se considera la sección más completa (López, 1980). Los miembros volcánicos constan de rocas piroclásticas y lávicas de composición dacítico-andesítica. De acuerdo con Rangin (1978) en INEGI (1984), la Formación Alisitos constituye un cinturón volcánico-sedimentario desarrollado en la parte noroccidental del país en forma paralela con otro en Sonora, evolucionando ambos sobre corteza continental. Estos cinturones han sido relacionados a la subducción y fusión parcial, asociadas a uno o más límites convergentes desarrollados en el noroeste de México, durante la apertura del Océano Atlántico y el movimiento de Norteamérica hacia el noroeste.

Rocas ígneas Intrusivas. Las rocas plutónicas que conforman los batolitos varían en composición mineralógica desde tonalitas hasta granodioritas y granitos; sin embargo, en algunas localidades se han cartografiado pequeños intrusivos de diorita y gabro. Los cuerpos plutónicos varían en edad de W a E, desde cretácicos en Baja California hasta cenozoicos en Chihuahua (Gastil y Krummenacher, 1978; Silver y Anderson, 1978). La mayor parte de estos emplazamientos batolíticos ocurrieron durante y después de los depósitos y emisiones magmáticas que dieron origen a la Formación Alisitos. Se considera que las rocas pertenecen al cinturón orogénico denominado Cordillera Norteamericana, que se estableció durante el Mesozoico. Esta unidad se presenta intrusionando a la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Alisitos y junto con dicha unidad, conforman las partes más elevadas de la región. Sus afloramientos muestran una estructura masiva, están fuertemente fracturadas y su intemperismo es en forma de bloques.

Cuaternario marino (Pleistoceno)

Gastil (1975) encontró depósitos de origen marino en la costa occidental del estado de Baja California. La Unidad fue estudiada en 1944 por Hertlein (en Gastil, op. cit.), reportando, como principal característica, un paquete de areniscas y conglomerados con alteraciones ferruginosas de color rojo, intercalado con areniscas fosilíferas y coquinas. Al sur de El Rosarito, los fragmentos mayores están bien redondeados y son del tamaño de guijarros, soportados por una matriz arenosa poco consolidada.

Depósitos recientes

Con este término se denomina a los depósitos más jóvenes que se distribuyen sobre las zonas topográficamente bajas; están representados por conglomerados, areniscas, que se presentan como terrazas continentales, depósitos aluviales y palustres.

Los depósitos de origen aluvial están compuestos por materiales producto de la denudación de rocas pre-existentes. Se encuentran distribuidos en zonas de pie de

monte y en los lechos de cauces de ríos, arroyos y zonas topográficamente bajas, formando en ocasiones abanicos aluviales. Los depósitos recientes están constituidos principalmente por intercalaciones de gravas y arenas con horizontes de arcilla y limo, generalmente el material está mal clasificado, no consolidado o con escasa compactación. Los depósitos recientes se encuentran distribuidos por toda el área cubriendo a las rocas más antiguas, por medio de discordancias angulares y litológicas.

3.2.3. Geología Estructural

La zona de estudio se ubica en la porción norte de la región conocida como Sierras Peninsulares, territorio que ha sido afectado por deformación, metamorfismo regional y emplazamiento de batolitos durante el Cretácico Temprano. Posteriormente, durante el Cretácico Tardío y principios del Terciario, estuvo sujeta a levantamiento y erosión. Adicionalmente, durante el Mioceno-Plioceno se produjo una serie de fallamientos que controlan el desarrollo geomorfológico en esta región.

3.3. Adquisición de datos

Para el presente proyecto de investigación se realizaron un total de 8 sondeos AMT y TEM con un espaciamiento de 90 m distribuidos a lo largo de dos perfiles con orientación N-S. La Figura 9 muestra la distribución de los sondeos AMT y TEM propuestos.

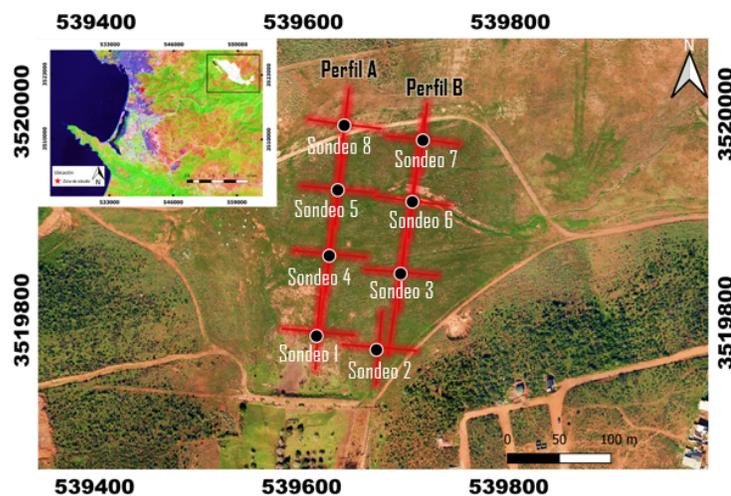


Figura 9. Distribución de sondeos de AMT y TEM propuestos. Figura creada en Google Earth.

3.3.1. Adquisición TEM

Para la adquisición de datos TEM se utilizó el sistema Geonics TEM 57. La corriente en el transmisor de este sistema está caracterizada por ser de tipo trapezoidal, bipolar y periódica (Figura 10 b), con los períodos de 33.3, 133 y 333 milisegundos (ms) (que corresponden a las frecuencias de repetición de 30, 7.5 y 3 Hz, respectivamente). Para cada frecuencia, la unidad receptora computarizada graba el decaimiento del voltaje en 20 ventanas logarítmicamente distribuidas dentro del primer y segundo intervalos de corte de corriente (Figura 10 c). Para reducir el efecto del ruido electromagnético ambiental, generalmente se graban y se promedian centenares de estos voltajes (Flores Luna, 2018). Se implementó un loop de 70 por 70 metros en un arreglo de bobina central (Figura 10 a), arreglo en el cual la bobina receptora se encuentra localizada en el centro de la espira.

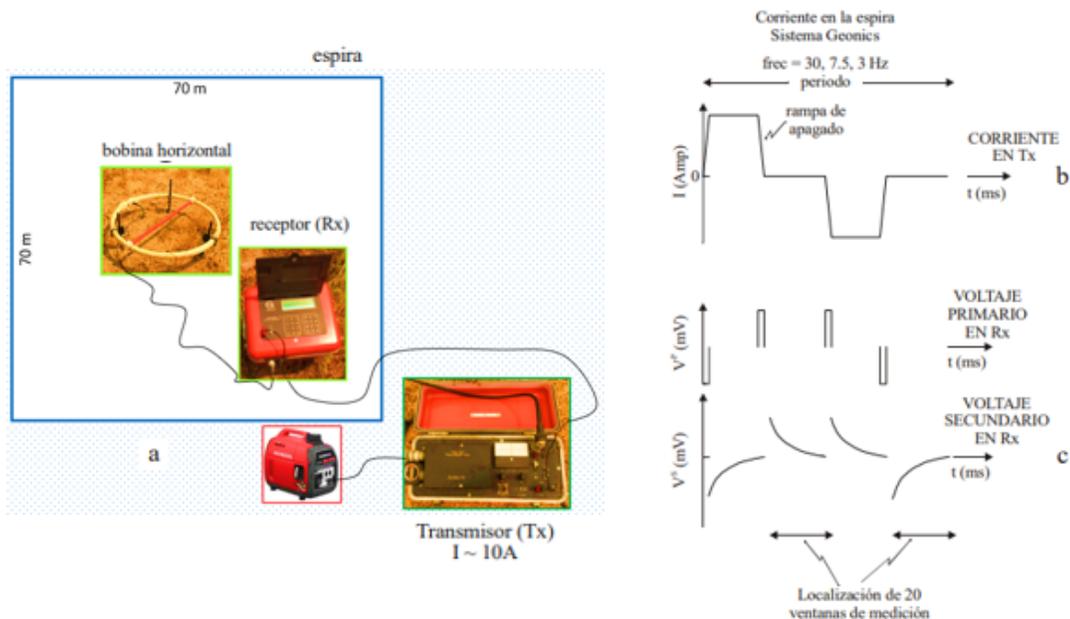


Figura 10. a) Arreglo de bobina central. b) Forma de la corriente inyectada en la espira transmisora del sistema Geonics. c) Voltajes primario y secundario inducidos en la bobina receptora. Localización de las ventanas de medición del voltaje en los dos lapsos de de corriente. (Flores Luna, 2018)

3.3.2. Adquisición AMT

Para la adquisición de datos AMT se utilizó el sistema Stratagem, el cual proporciona imágenes de la conductividad del subsuelo para profundidades comprendidas entre los 10 y algunos miles de metros. Su rango de frecuencia es de 10 Herz (Hz) hasta 100 kilohertz (kHz). Se emplearon dos dipolos de 50 metros (Figura 11 b) para medir dos componentes horizontales del campo eléctrico y dos bobinas de inducción para medir las componentes horizontales de la variación del campo magnético. Se emplearon únicamente las componentes horizontales (Figura 11 a).

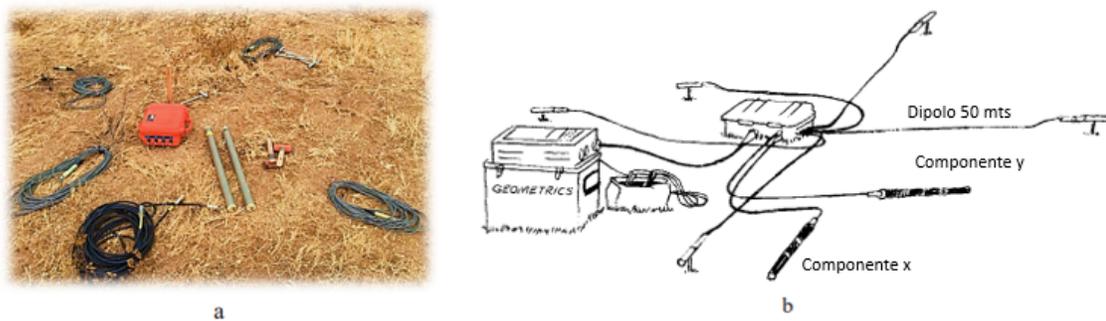


Figura 11. a) Configuración en campo AMT. b) Distribución del dipolos eléctricos y bobinas.

Capítulo 4. Procesamiento de datos

En el presente capítulo se describirá el procesamiento realizado a los datos AMT y TEM adquiridos en campo.

4.1. Procesamiento de datos TEM 1D

Los datos medidos por el instrumento Geonics, descrito en el capítulo anterior, muestran un conjunto de mediciones de decaimiento de voltaje, por tanto, es necesario realizar un promedio de los mismos. Fue necesaria la implementación de algoritmos creados en fortran, los cuales nos permitieron obtener un promedio de los voltajes. A continuación se mostrarán los pasos a seguir para el procesamiento:

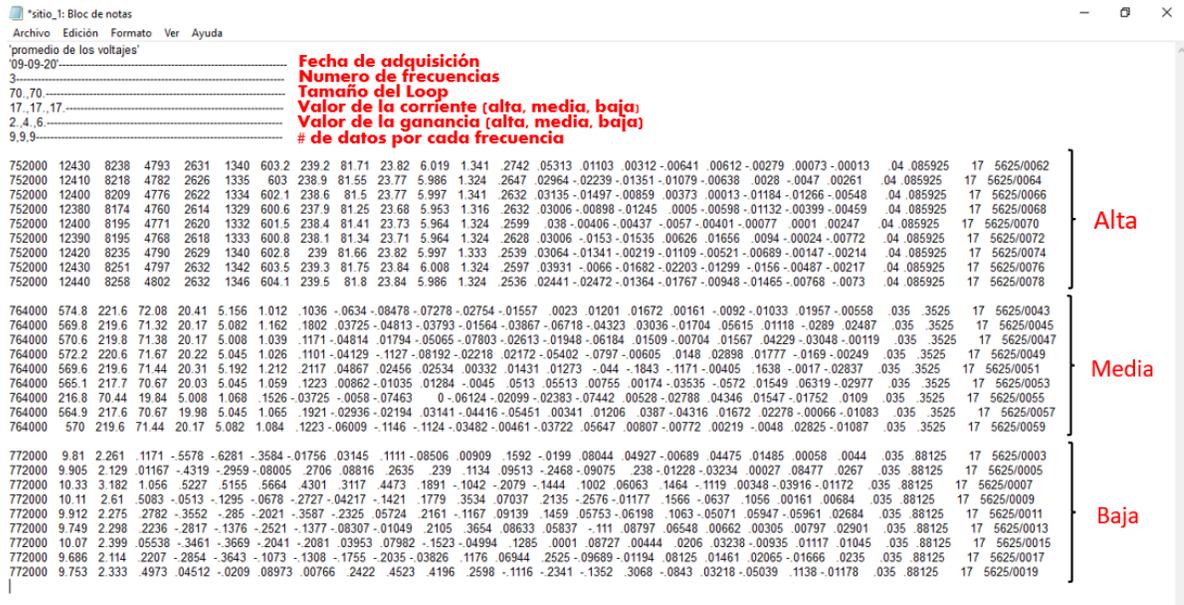


Figura 12. Panel de datos extraídos del sistema Geonics TEM 57.

La Figura 12 muestra un ejemplo del sondeo 1 en donde se puede apreciar algunos de los parámetros empleados en campo como lo es tamaño de la espira, número de frecuencias, valores de la corriente empleada en cada frecuencia, valor de ganancia aplicada y el número de datos obtenidos para cada una de las frecuencias. Como primer paso del procesamiento se corrigen los voltajes por las ganancias posteriormente fue necesario realizar un promediado (Figura 13) de los voltajes observados con la finalidad de visualizar de mejor manera las curvas de decaimiento de voltaje.

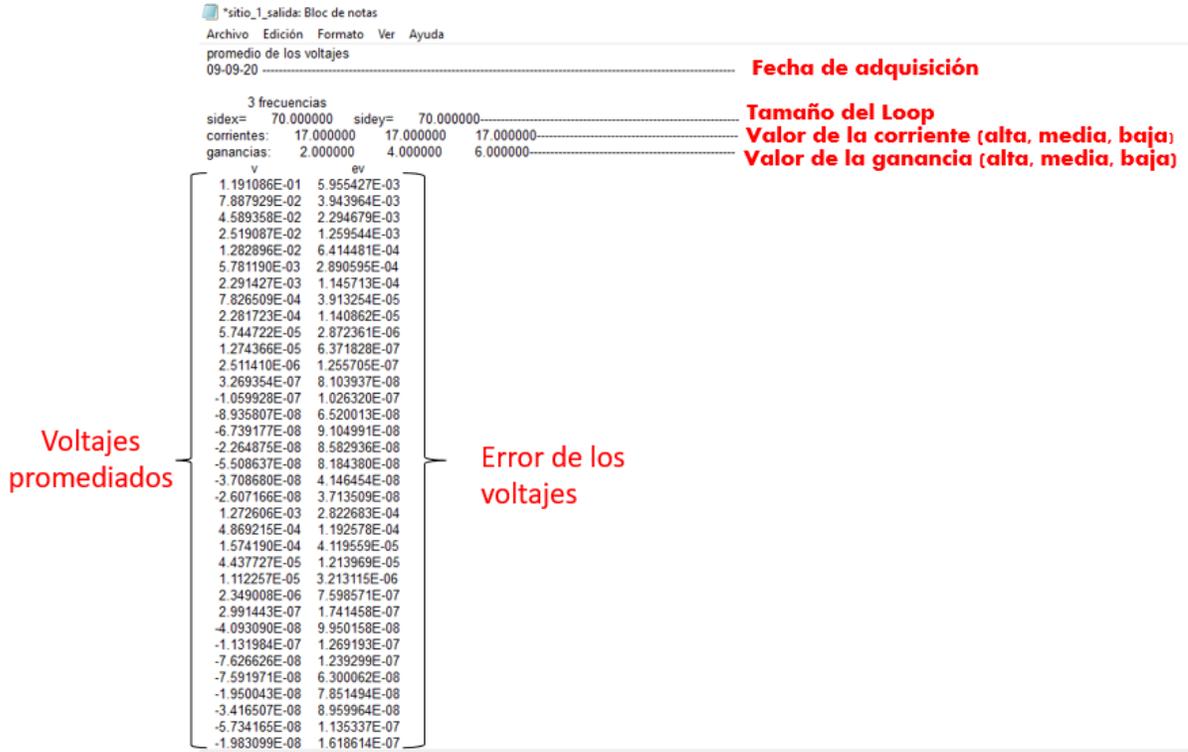


Figura 13. Panel de datos promediados

Una vez obtenidos los voltajes promediados se hizo uso del software Matlab, el cual nos permitió graficar cada una de las curvas de decaimiento de voltaje (Figuras 14-21).

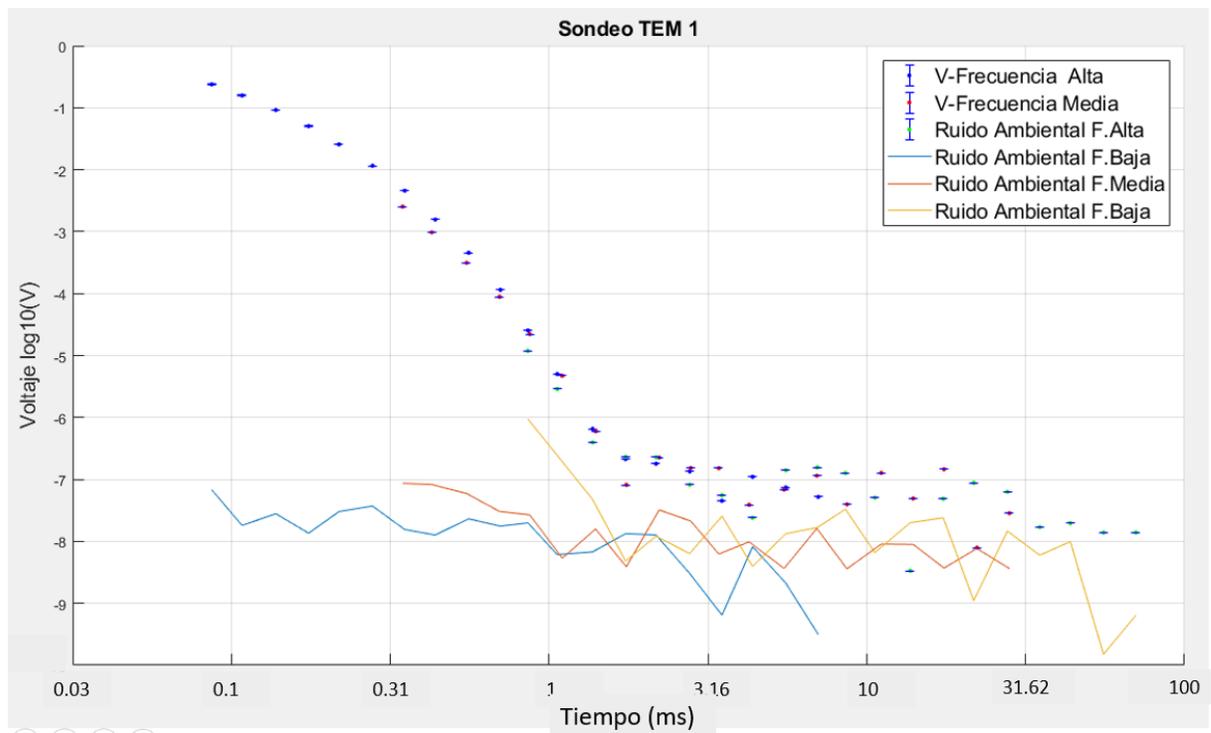


Figura 14. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 1 pertenecientes al Perfil A.

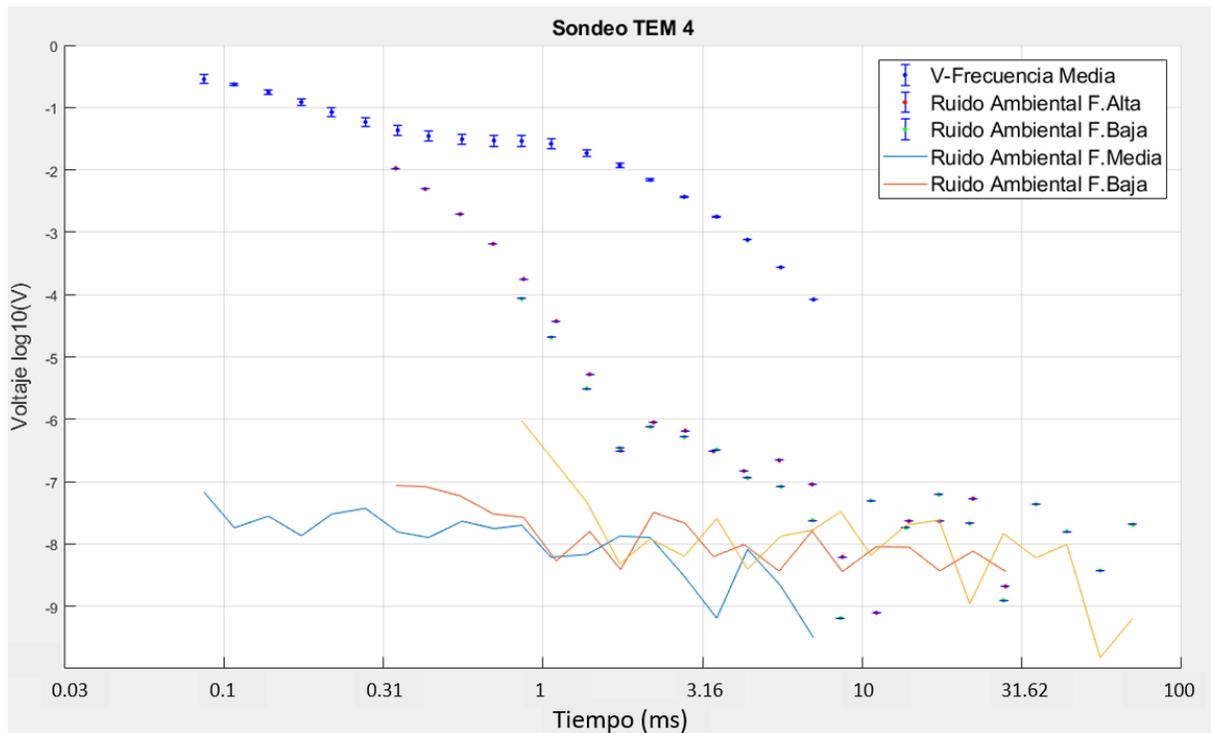


Figura 15. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 4 pertenecientes al Perfil A.

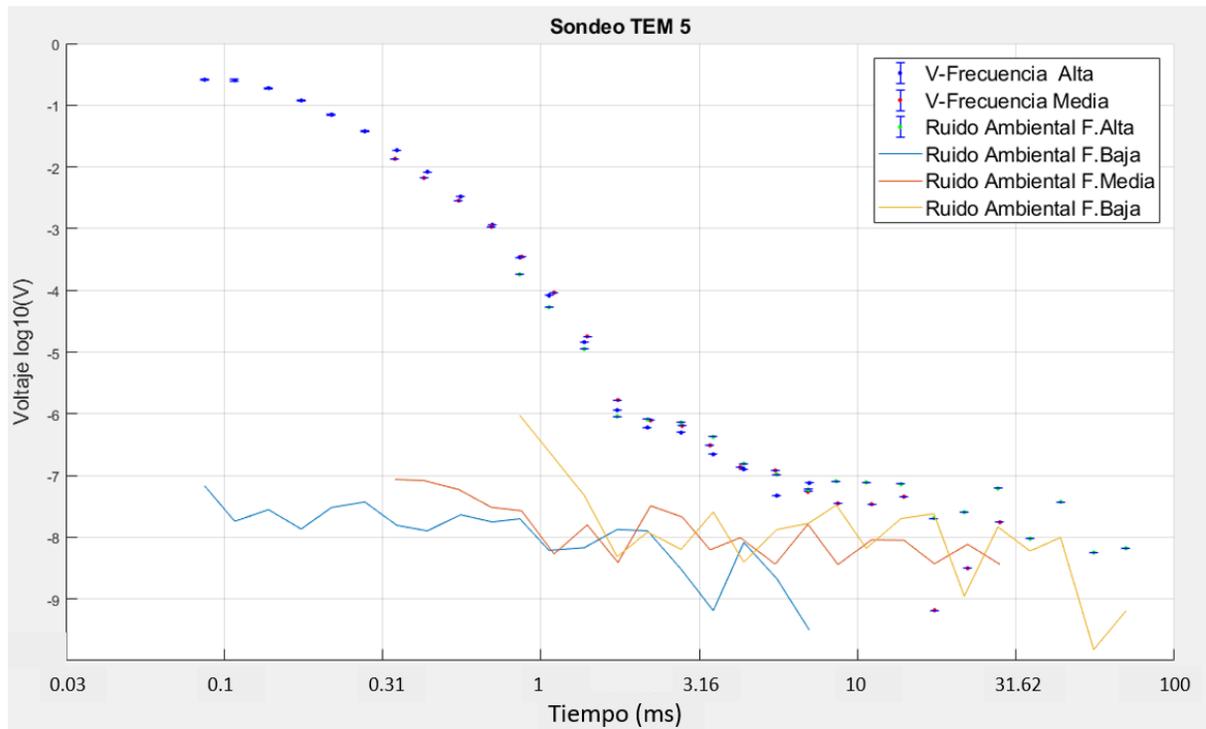


Figura 16. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 5 pertenecientes al Perfil A.

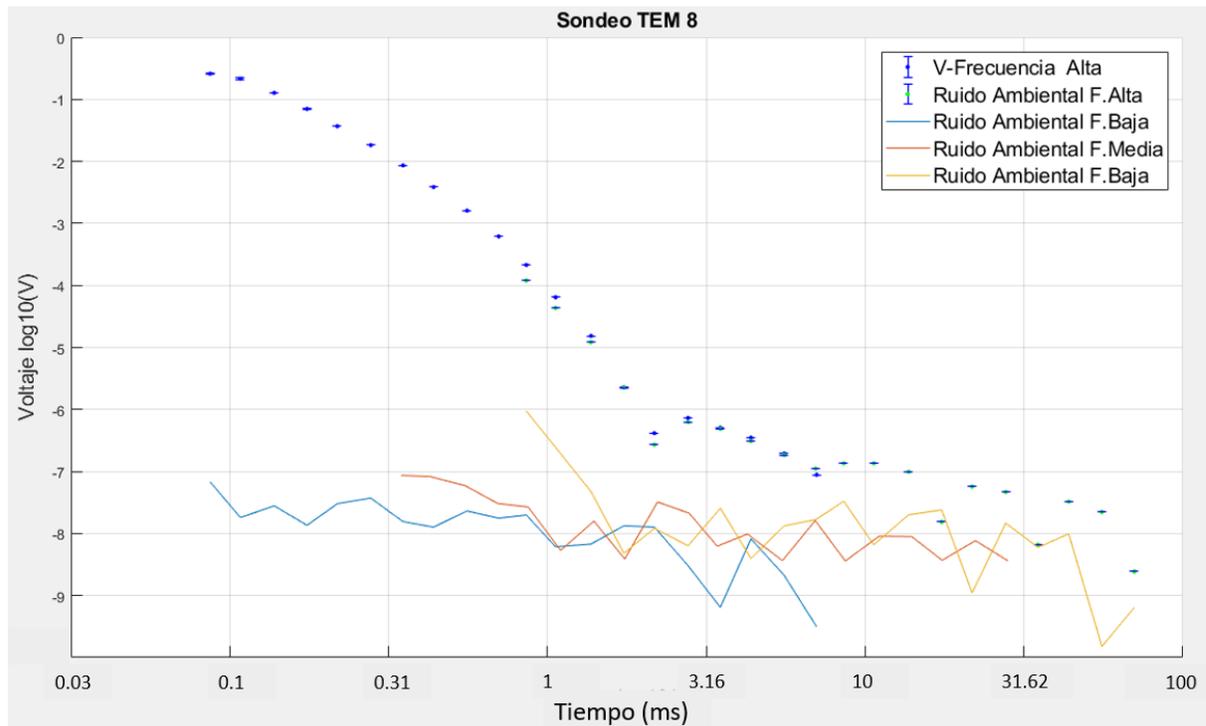


Figura 17. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 8 pertenecientes al Perfil A.

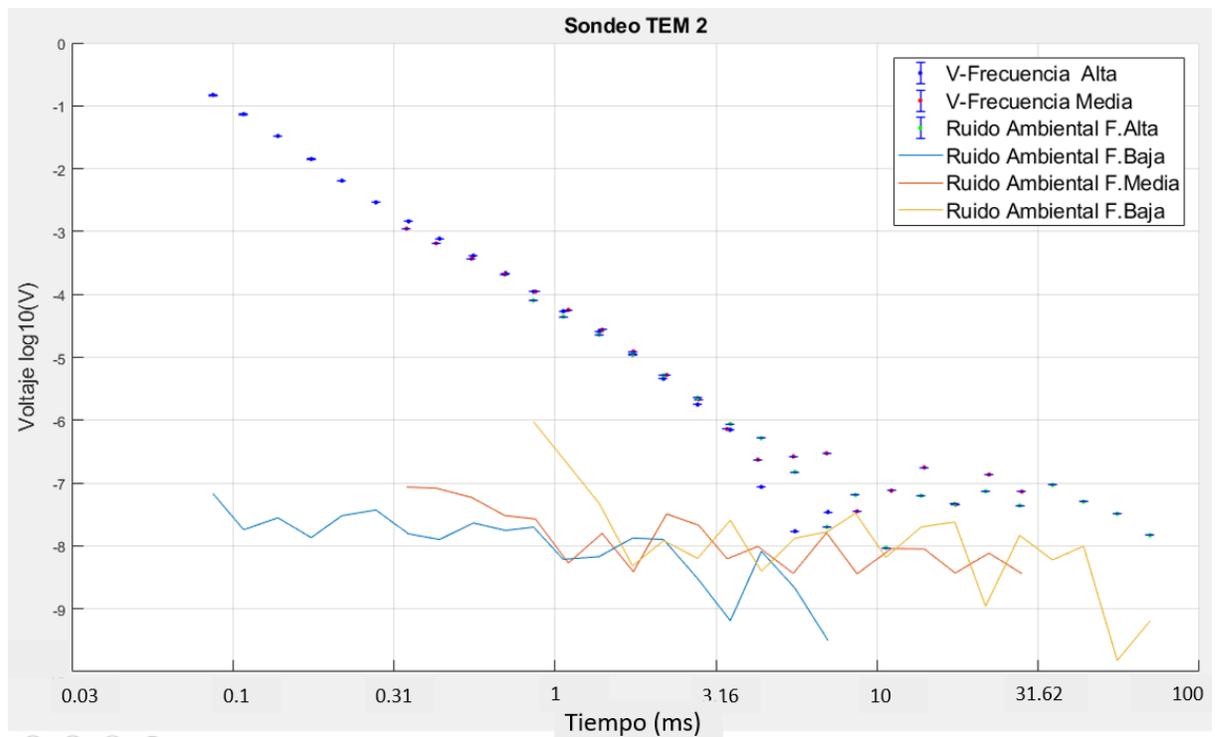


Figura 18. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 2 pertenecientes al Perfil B

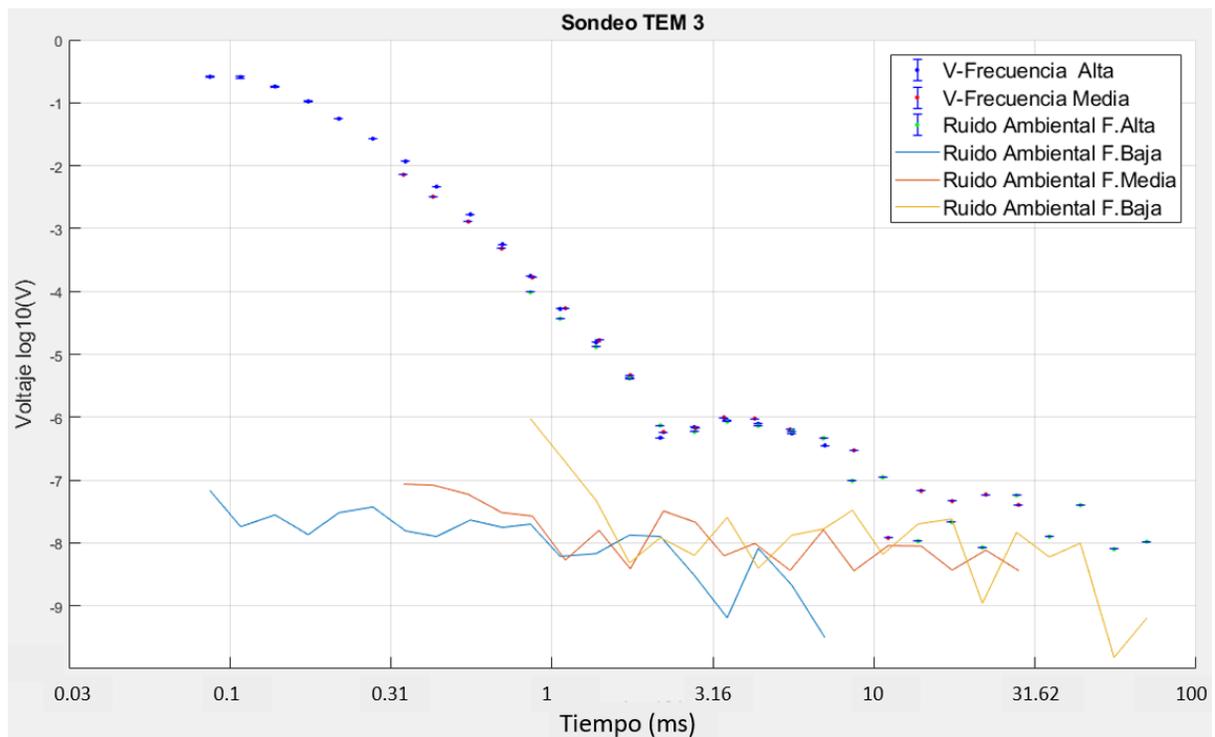


Figura 19. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 3 pertenecientes al Perfil B

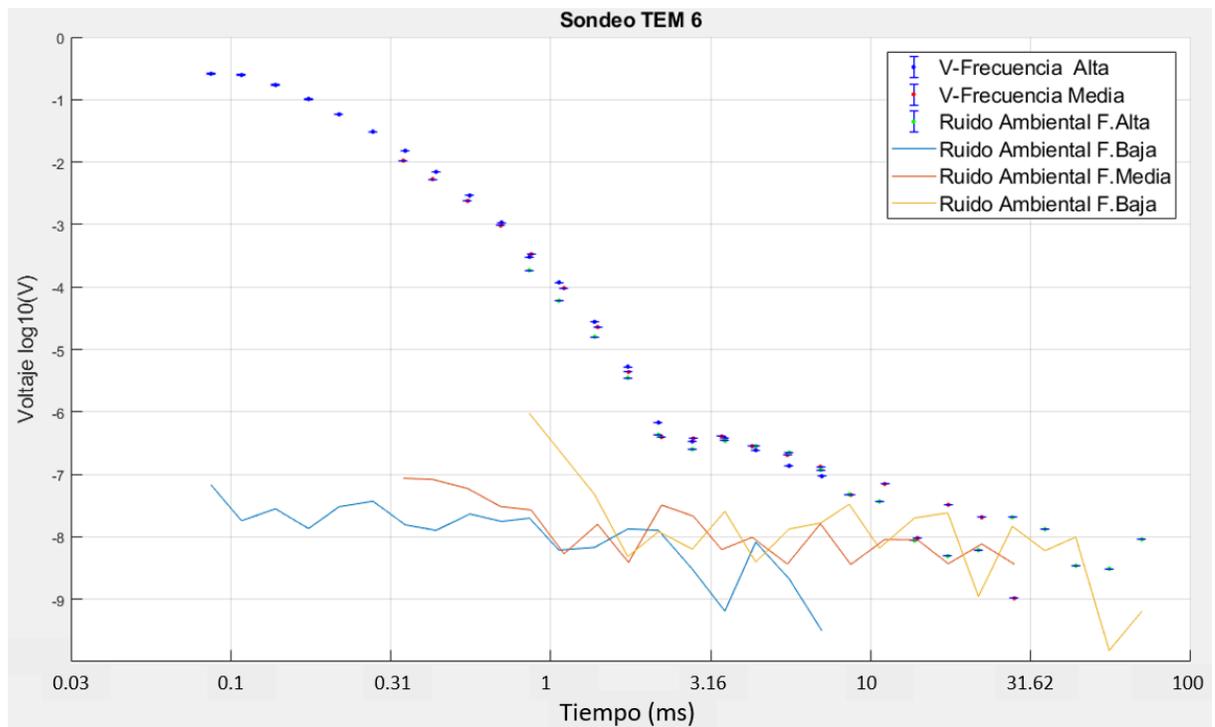


Figura 20. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 6 pertenecientes al Perfil B

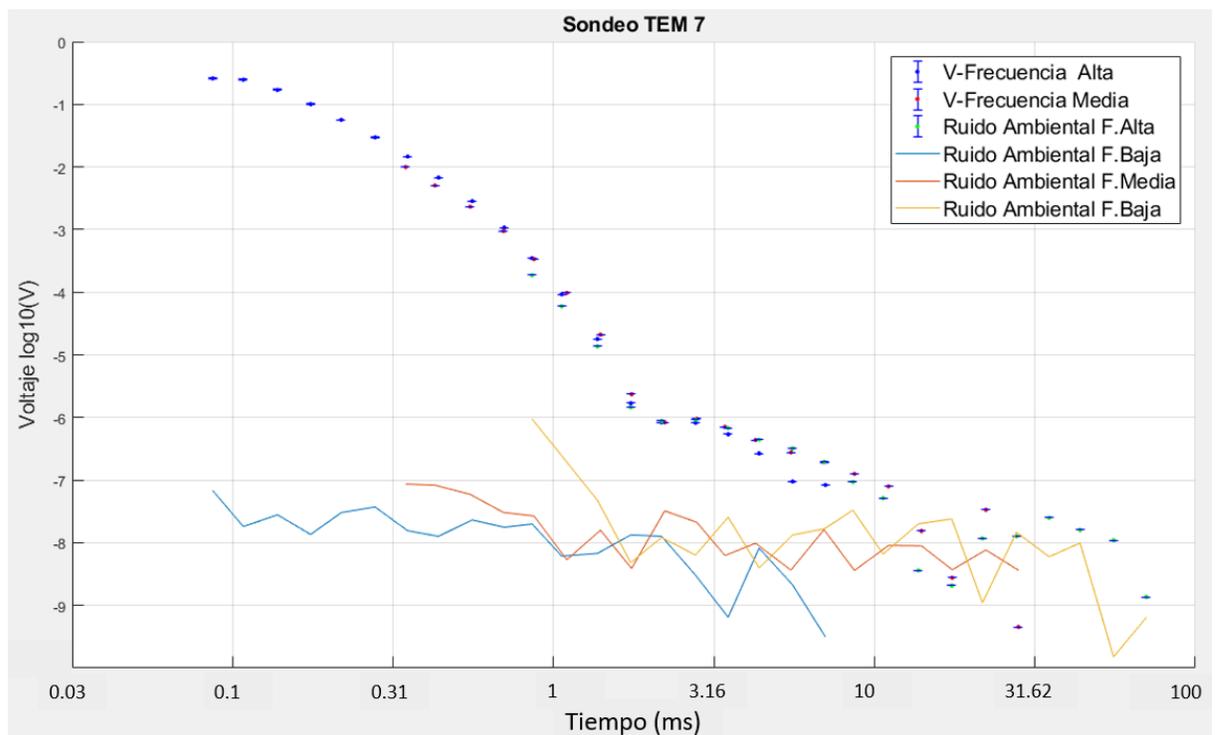


Figura 21. Curvas de decaimiento de voltaje del sondeo TEM 7 pertenecientes al Perfil B

Las curvas de decaimiento de voltaje obtenidos previamente nos ayudan para visualizar el comportamiento de los datos observados para cada una de las frecuencias,

en ellas podemos apreciar las mediciones empleadas para la frecuencia alta, media y baja respectivamente, además, se muestran también en líneas continuas de color azul, rojo y naranja, las respuestas del ruido electromagnético medido para cada una de las frecuencias empleadas en la zona de estudio.

Este análisis nos permitirá verificar con certeza hasta dónde nuestros datos observados ya fueron contaminados por ruido y no ser considerados al momento del procesado. Algunas de las curvas del sondeo 4 muestran un comportamiento muy diferente a otras curvas del mismo sondeo y de sondeos vecinos. Estos datos anómalos fueron ignorados.

Como siguiente paso del procesado se usó el programa TRIM en Fortran, software que invierte los voltajes de un sondeo TEM a un subsuelo de capas con resistividades dispersivas (Flores y Peralta-Ortega, 2009). Flores Luna, en uno de sus trabajos (Flores Luna 2000), menciona que el proceso para obtener el voltaje inducido en una bobina horizontal colocada en el centro de una espira circular sobre un subsuelo estratificado es más complicado que las respuestas de SEV y MT, ya que es necesario calcular primero la respuesta en frecuencias y después transformarla al tiempo. El proceso de cálculo se puede sintetizar en tres etapas: transformada de Hankel, transformación al tiempo y corrección por rampas y periodicidad.

La Figura 22 muestra el panel de datos de entrada para el programa TRIM. En ella podemos definir los parámetros de entrada que tendrá el modelo inicial usado en la inversión 1D.

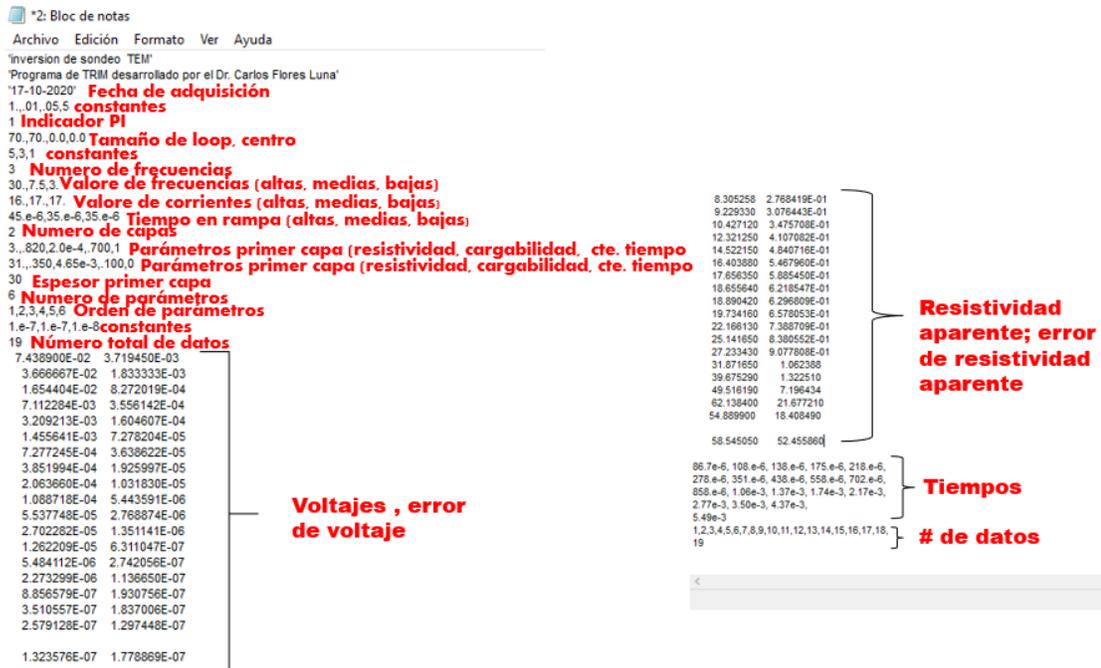


Figura 22. Parámetros Cole-Cole utilizados en el panel de entrada del programa TRIM. (Flores Luna, 2000)

Este procedimiento se realizó para los ocho sondeos TEM medidos en campo.

4.2. Procesamiento de datos AMT 1D

El equipo Stratagem fue el equipo usado en el levantamiento de los datos en campo. Este equipo proporciona las potencias cruzadas entre los campos medidos como salida, por lo que es necesario estimar las impedancias haciendo un promedio robusto en ventanas de frecuencia. Los datos fueron leídos por el programa en Matlab Stratagem (Romo, 2019). Las Figuras 23 y 24 muestran las curvas de resistividad aparente, fase y coherencia para cada uno de los sondeos AMT realizados. En las curvas de resistividad aparente se puede observar la tendencia de una capa conductora hacia una capa resistiva. Las curvas de coherencia nos permiten indicar una calidad óptima, de los datos. Valores cercanos a 1 son considerados datos de calidad óptima mientras que los valores mayores a 0.7 se consideran datos de buena calidad. En cada uno de los sondeos podemos observar que en periodos menores a 10^{-4} segundos (es decir, frecuencias mayores a 10,000 Hz) las coherencias son muy bajas. Esto se refleja en resistividades aparentes muy dispersas.

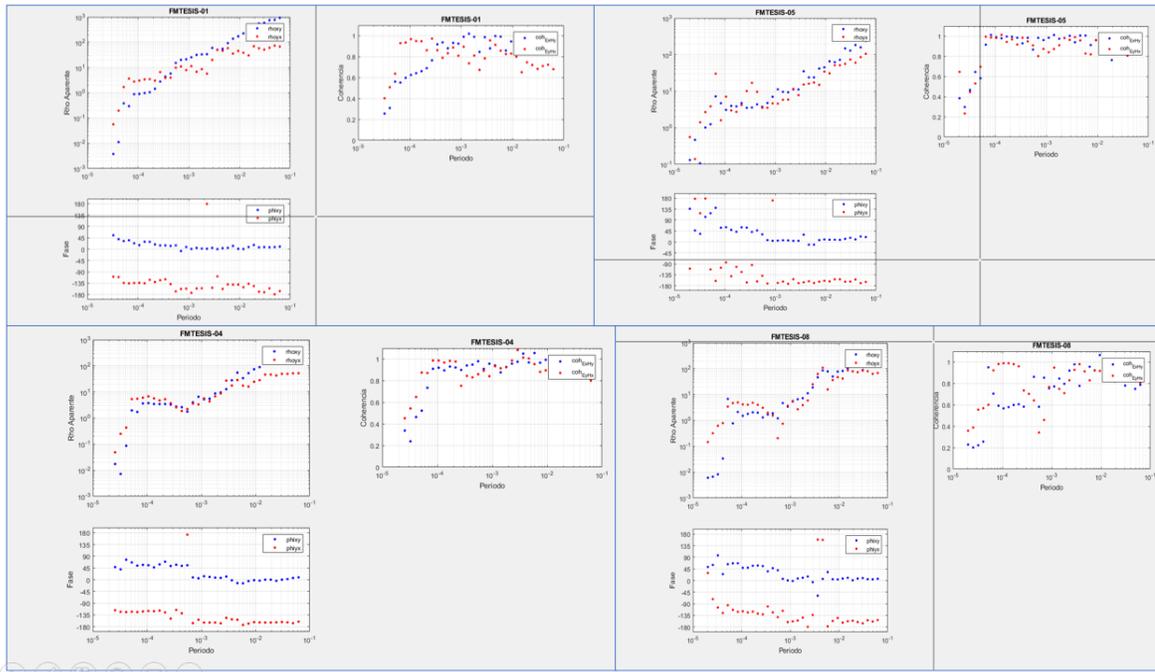


Figura 23. Curvas de resistividad aparente, fase y coherencia de los sondeos AMT del Perfil A.

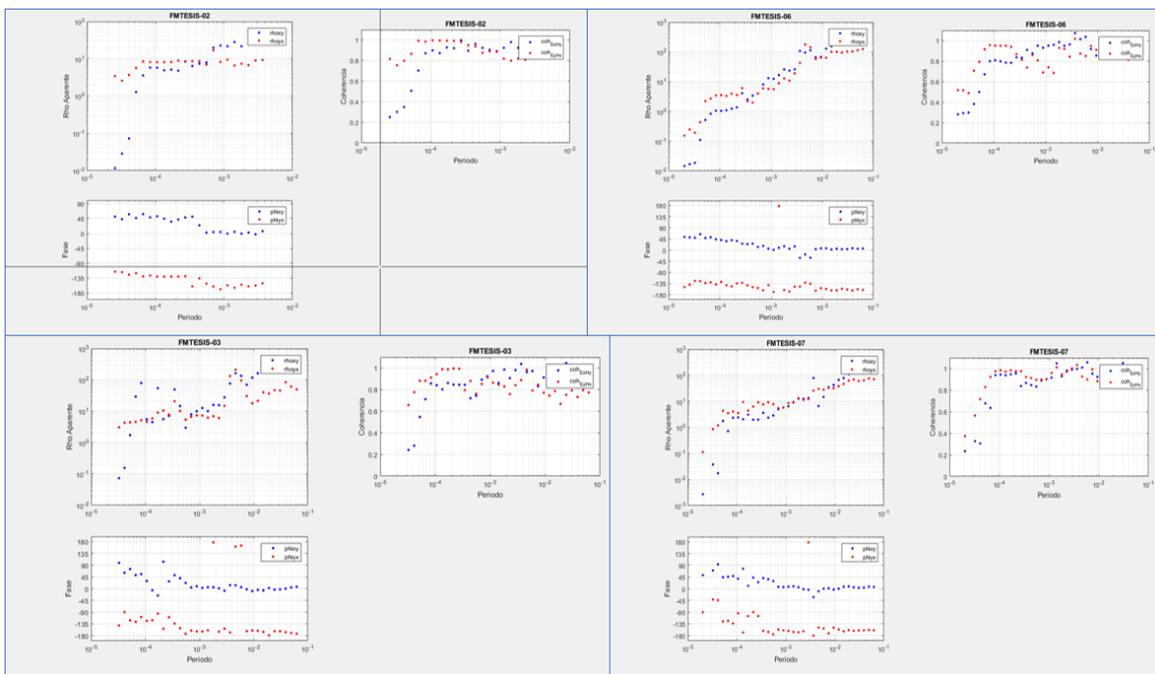


Figura 24. Curvas de resistividad aparente, fase y coherencia de los sondeos AMT del Perfil B.

Para la interpretación en 1D es conveniente utilizar la resistividad aparente y la fase del determinante del tensor de impedancia. En la Figura 25 y 26 se muestra el determinante en color verde, la componente rhoxy en color azul y la componente rhoxyx en color rojo.

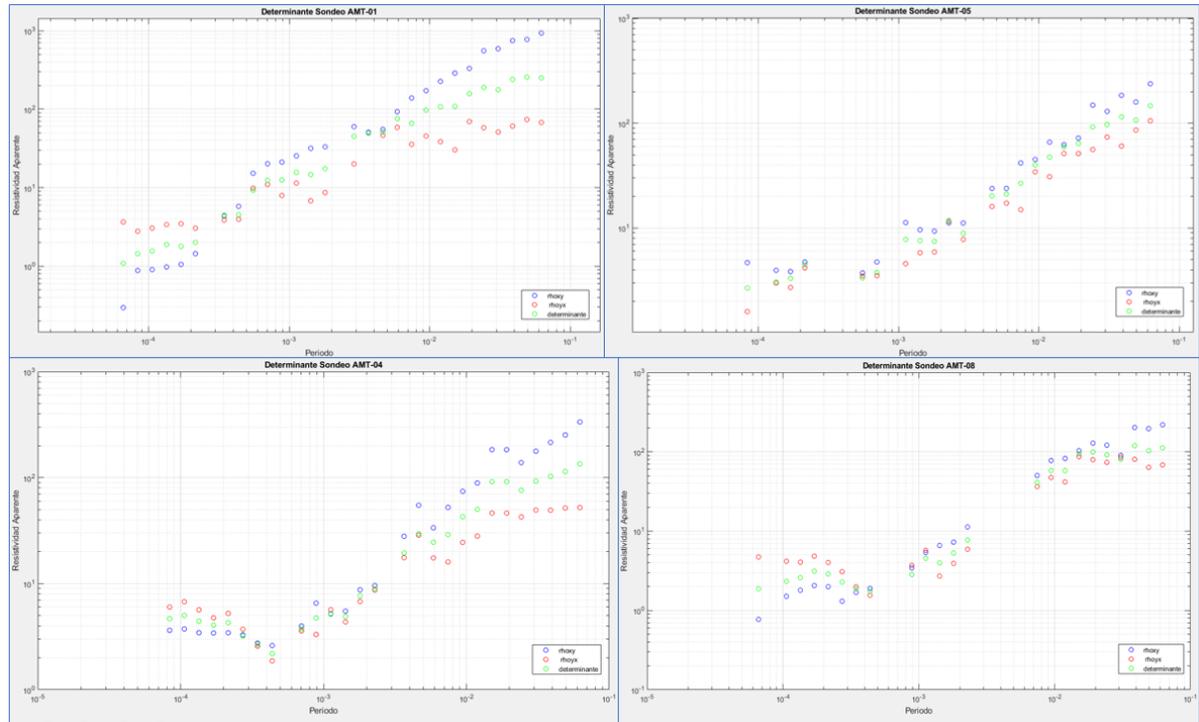


Figura 25. Curvas de resistividad aparente para la componente ρ_{xy} , ρ_{yx} y el determinante del Perfil A.

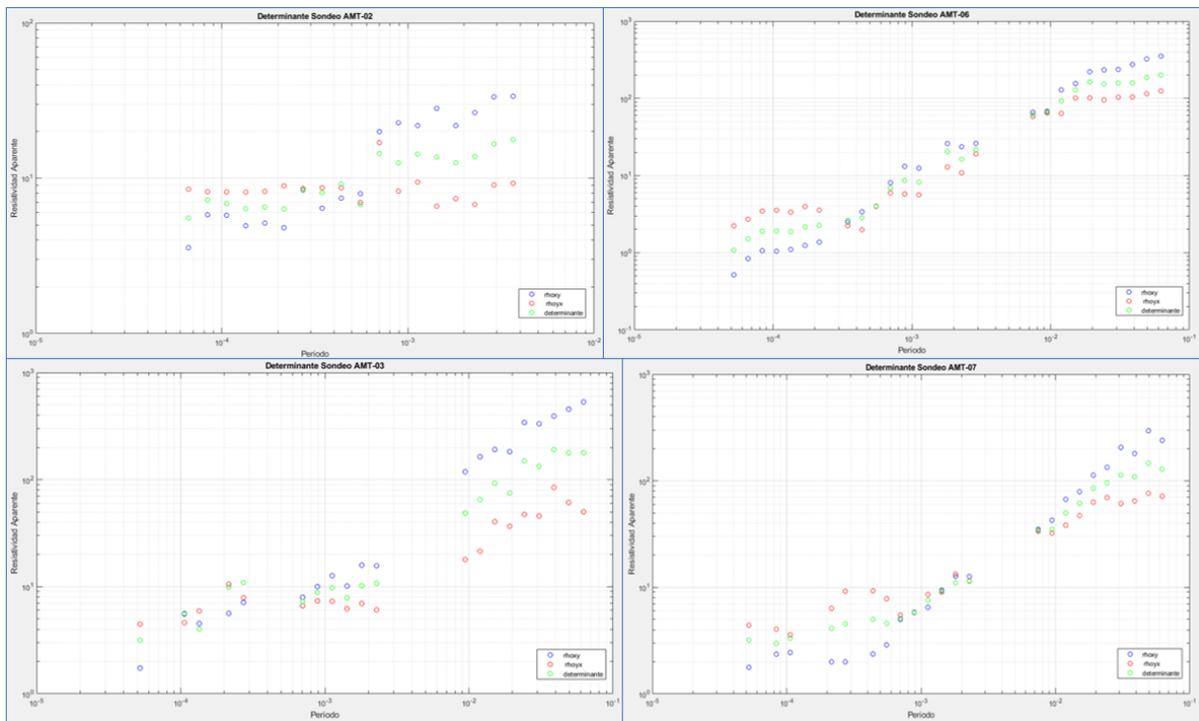


Figura 26. Curvas de resistividad aparente para la componente ρ_{xy} , ρ_{yx} y el determinante del Perfil B.

Capítulo 5. Inversión de datos

En esta sección analizaremos los resultados obtenidos en la inversión de datos TEM y AMT. La inversión de datos nos permite reconstruir una imagen del subsuelo a partir de datos previamente observados en la superficie. Las curvas de decaimiento de voltaje, las resistividades aparentes y las fases del conjunto de datos observados nos permitirán obtener un modelo geoelectrico del subsuelo que explique convenientemente los datos.

A continuación se muestran las inversiones en 1D de los datos para cada uno de los ocho sitios. La inversión 1D tiene como objetivo representar el subsuelo desde la perspectiva de un modelo simple, es decir, modelos que varían únicamente con la profundidad.

5.1. Inversión de datos TEM 1D

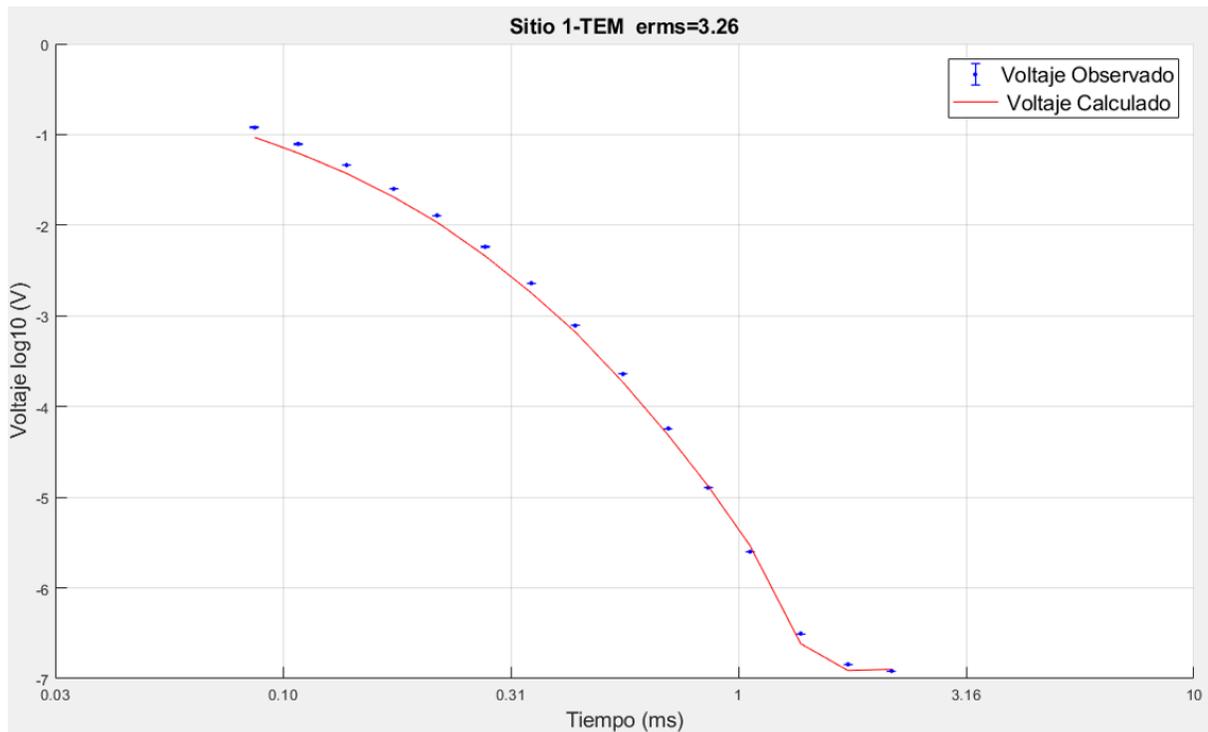
Los voltajes calculados de los modelos invertidos para cada uno de los sondeos TEM se muestran a continuación en la Figuras 28-35. En ellos podemos visualizar los datos observados con su respectivo error en color azul, mientras que la respuesta del modelo inverso se muestra en línea roja continua, se puede apreciar que el ajuste es bueno en cada uno de ellos.

Los modelos iniciales elegidos para la inversión de cada uno de los sitios TEM incluyen buscar soluciones que ajusten a los datos y además que estas soluciones sean lo más suave posible. Se establecieron modelos de dos capas, una primera con valores de resistividad que comprendían entre los 2 y 4 ohm-m, asociando esta con una capa conductora, mientras que la segunda capa comprendió valores que varían entre los 30 y 32 ohm-m; esto para cada uno de los sondeos. Tras pruebas realizadas se determinó necesario considerar al medio polarizable, esto al observar que los datos mostraban el fenómeno de PI, por lo cual se consideró para la primer capa valores de cargabilidad (m), constante de tiempo (τ), resistividad de frecuencia cero (ρ_0) y el espesor de la capa (z). La Tabla 1 muestra los parámetros de Cole-Cole como resultado de la inversión 1D de los datos TEM.

Tabla 1. Parámetros Cole-Cole de los Modelos Inversos 1D

| Parámetros Cole-Cole | | | | | | |
|----------------------|----------|-------|----------|-------|-------|------|
| Sondeos | Capa 1 | | | | | RMS |
| | ρ_0 | m | τ | C | Z | |
| TEM 1 | 5.68 | 0.779 | 6.75E-05 | 0.732 | 48.06 | 2.32 |
| TEM 2 | 5.9 | 0.44 | 1.17E-04 | 0.694 | 30.76 | 3.26 |
| TEM 3 | 2.38 | 0.868 | 1.18E-04 | 0.723 | 32.81 | 2.48 |
| TEM 4 | 2.38 | 0.384 | 1.85E-04 | 0.737 | 20.78 | 1.08 |
| TEM 5 | 2.25 | 0.597 | 1.89E-04 | 0.741 | 30.01 | 3.47 |
| TEM 6 | 2.17 | 0.66 | 1.62E-04 | 0.724 | 28.1 | 2.38 |
| TEM 7 | 1.97 | 0.328 | 2.27E-04 | 0.742 | 18.64 | 2.01 |
| TEM 8 | 2.65 | 0.404 | 1.70E-04 | 0.706 | 22.95 | 1.27 |

Por otra parte, las Figuras 35-42 muestran los resultados de la inversión 1D para cada uno de los sondeos TEM con su respectivo RMS (Root Mean Square), en ellos se puede observar que el rango de resistividades obtenido para la primera capa tiene valores en un intervalo de 2 - 6 ohm-m, mientras que para la segunda capa son de 20-36 ohm-m. Por otra parte, el espesor para la primera capa se encuentra en un intervalo de 19 a 48 metros.

**Figura 27.** Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 1 del Perfil A.

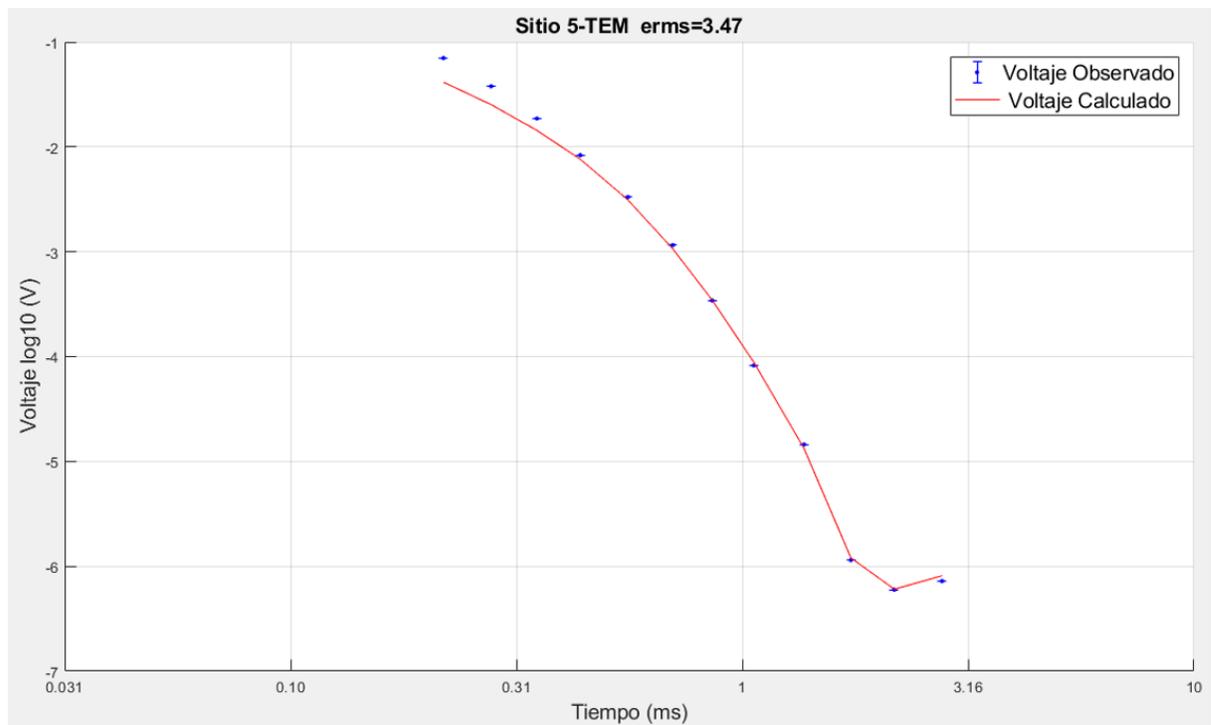


Figura 28. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 5 del Perfil A.

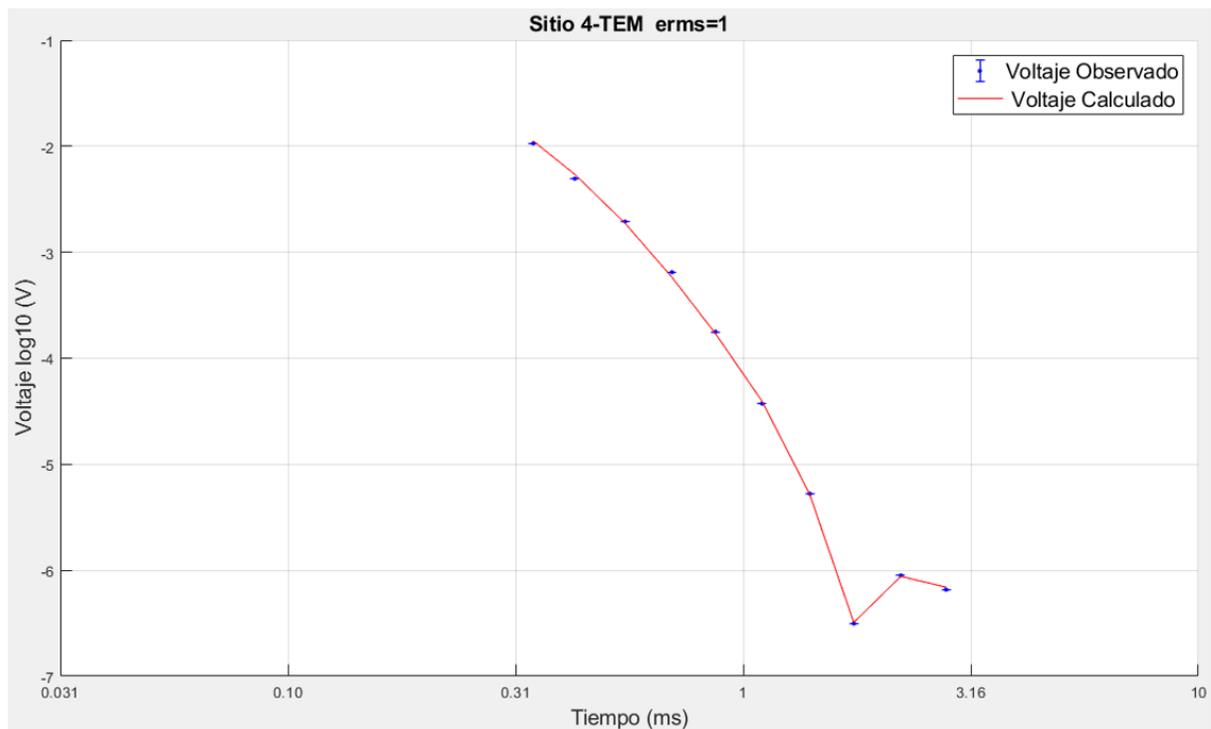


Figura 29. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 4 del Perfil A.

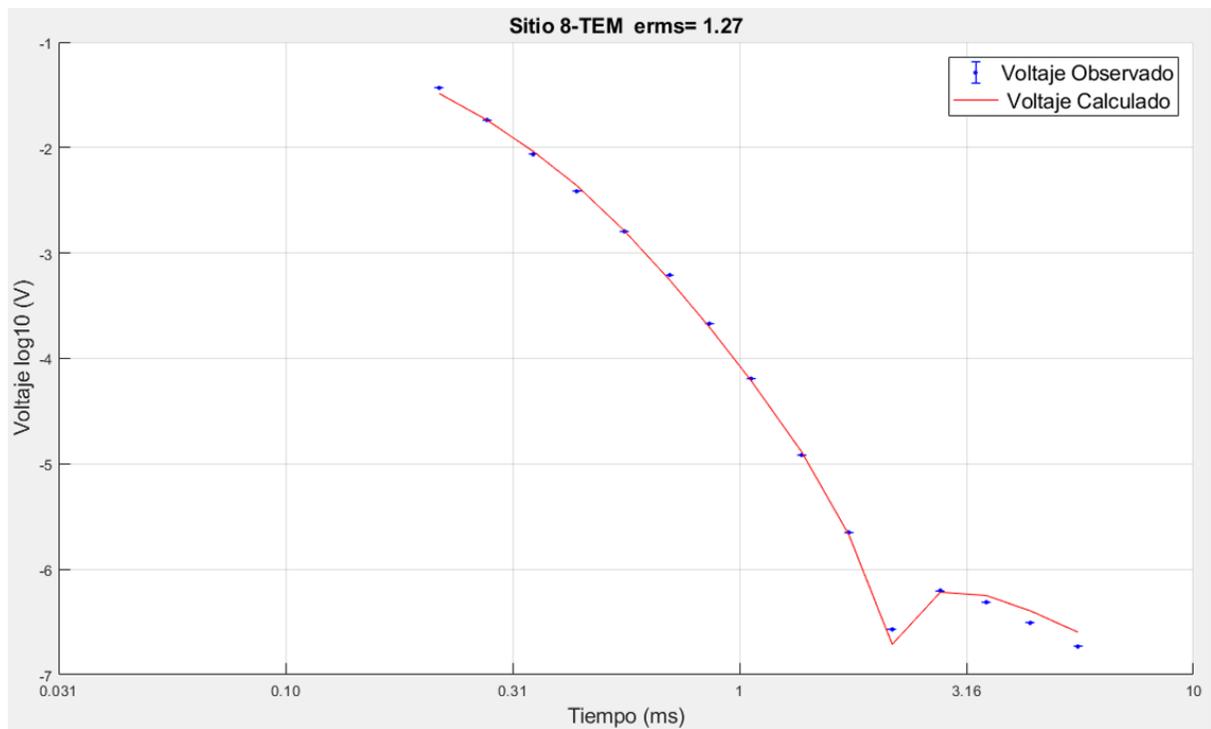


Figura 30. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 8 del Perfil A.

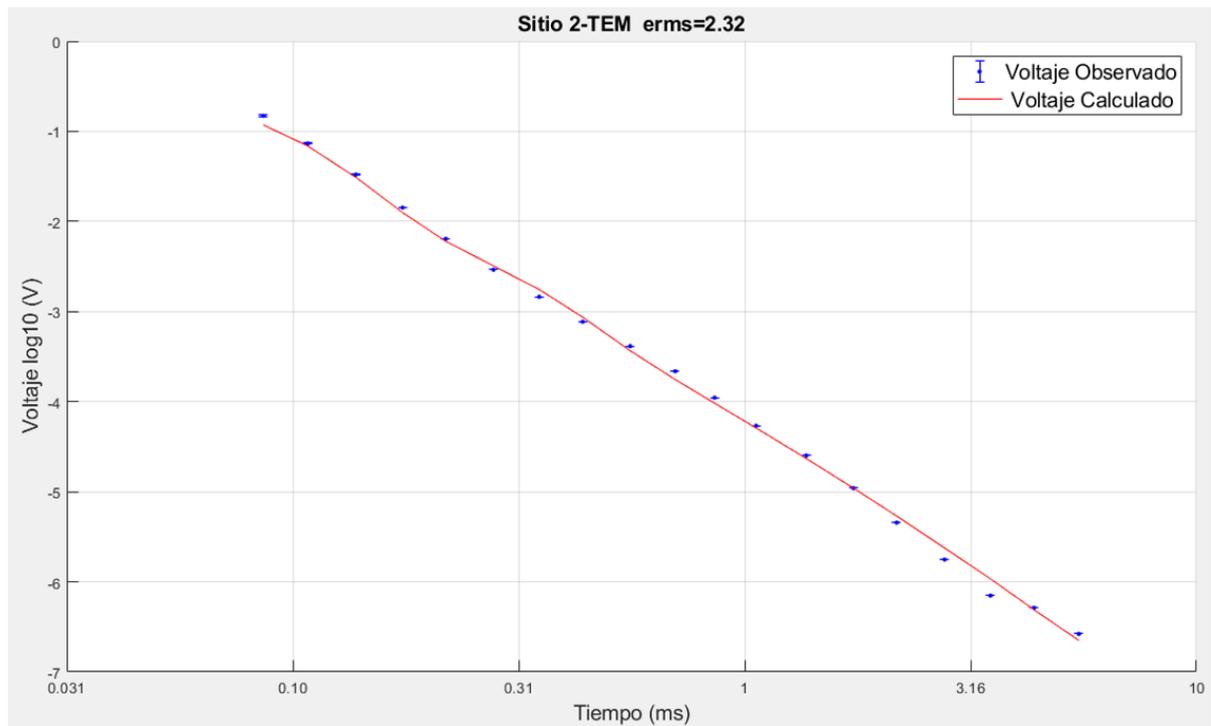


Figura 31. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 2 del Perfil B.

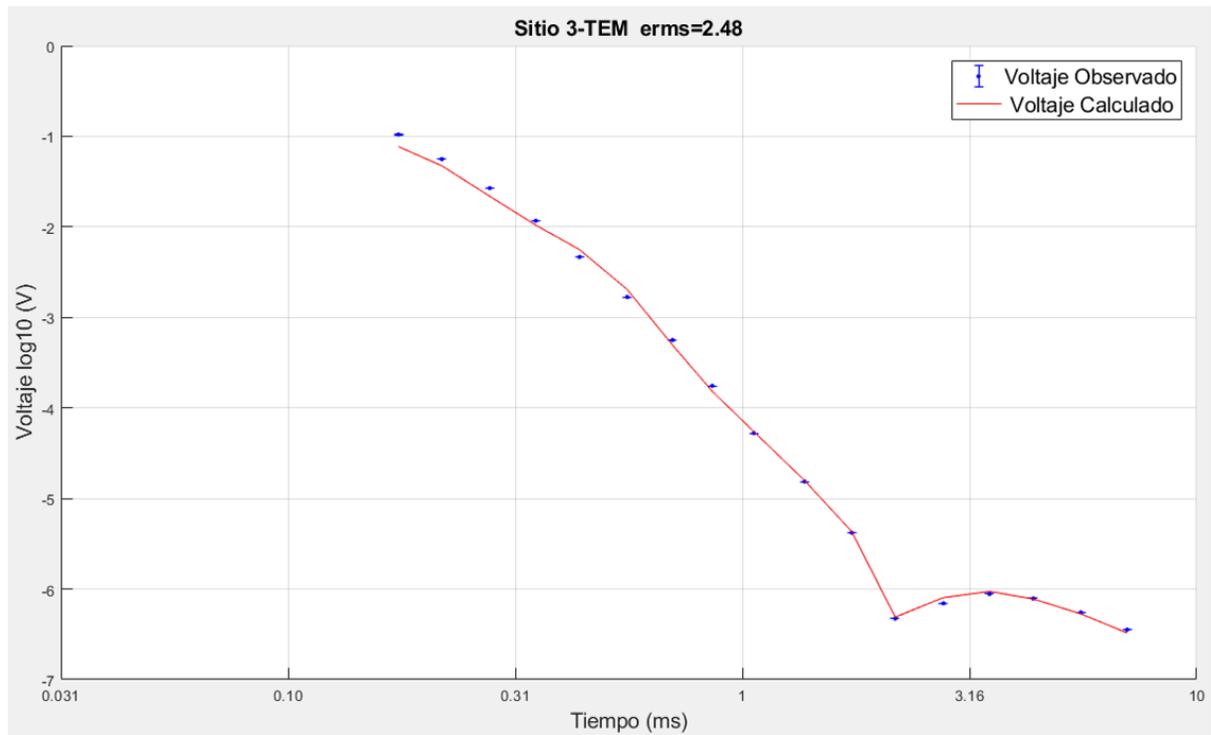


Figura 32. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 3 del Perfil B.

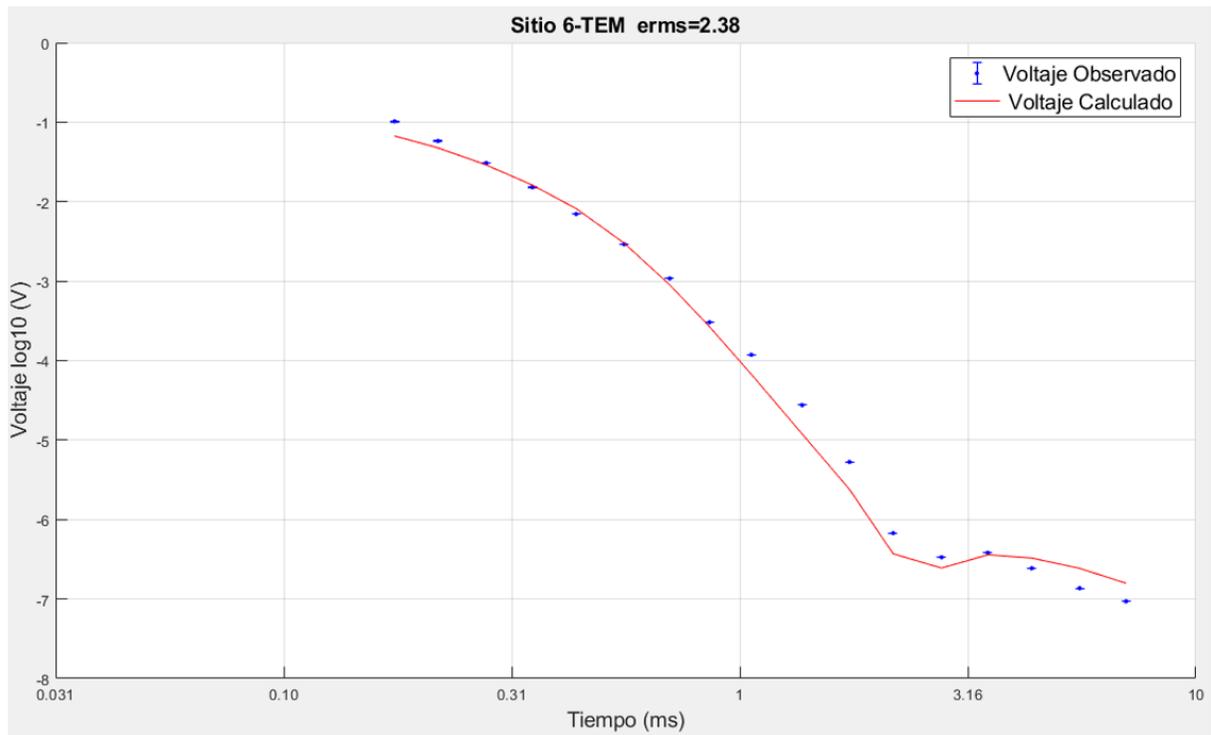


Figura 33. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 6 del Perfil B.

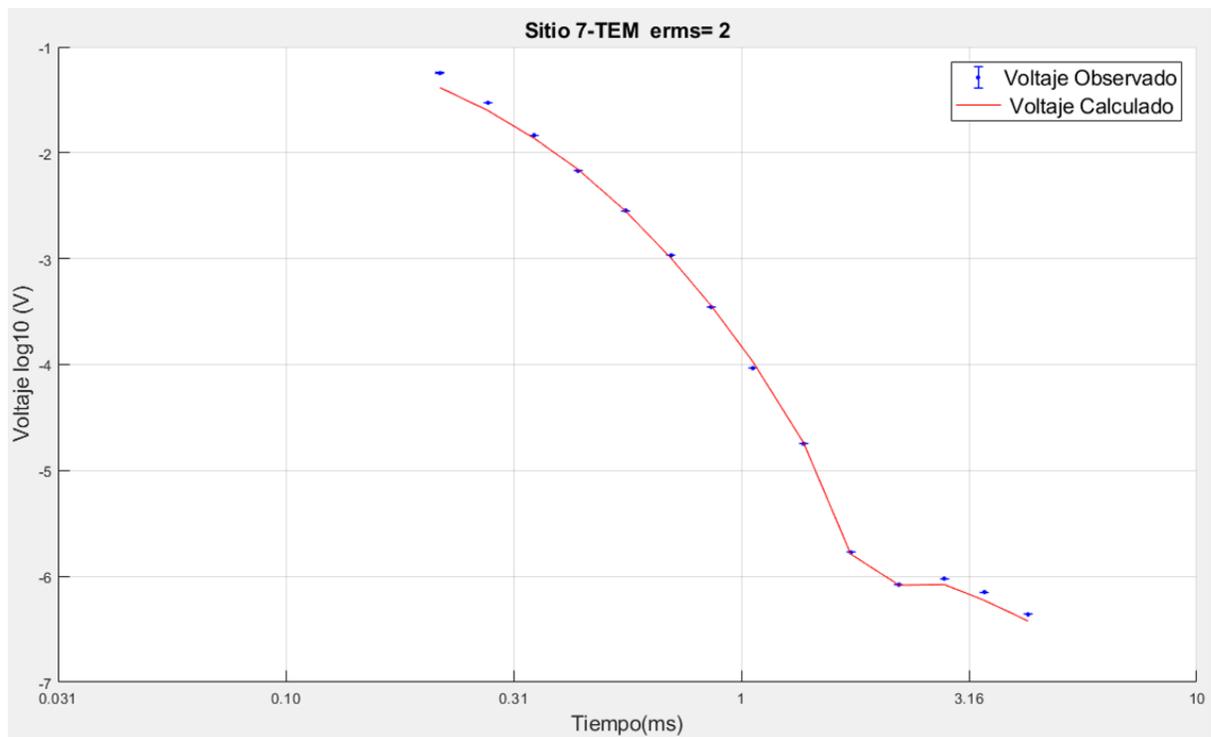


Figura 34. Resultados de inversión 1D del sondeo TEM 7 del Perfil B.

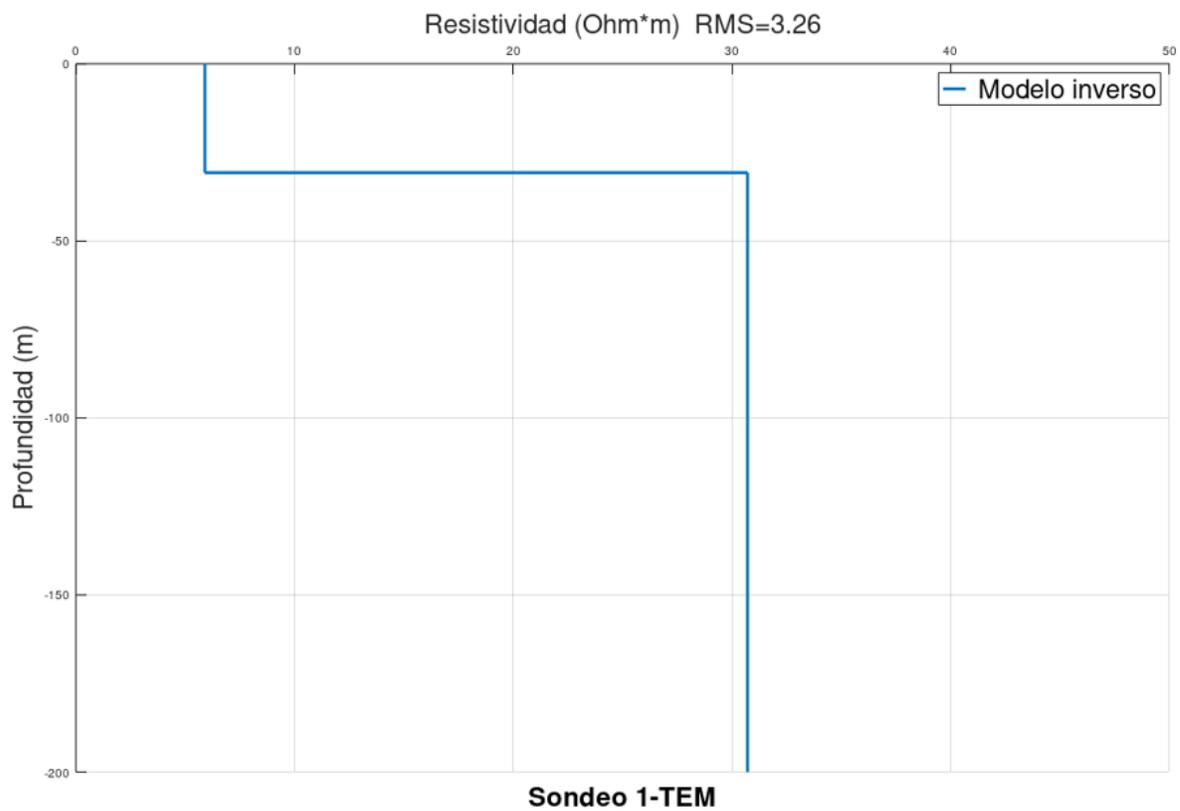


Figura 35. Modelo 1D del sondeo TEM 1 para el Perfil A.

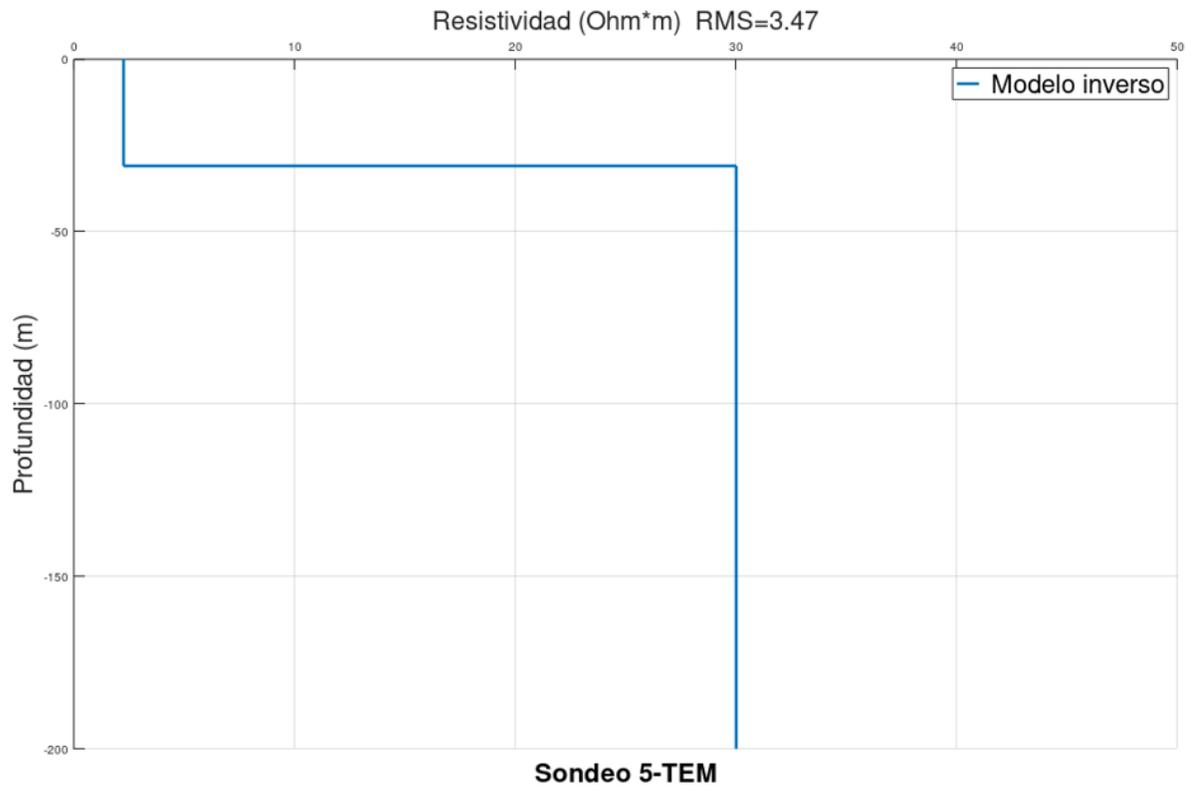


Figura 36. Modelo 1D del sondeo TEM 5 para el Perfil A.

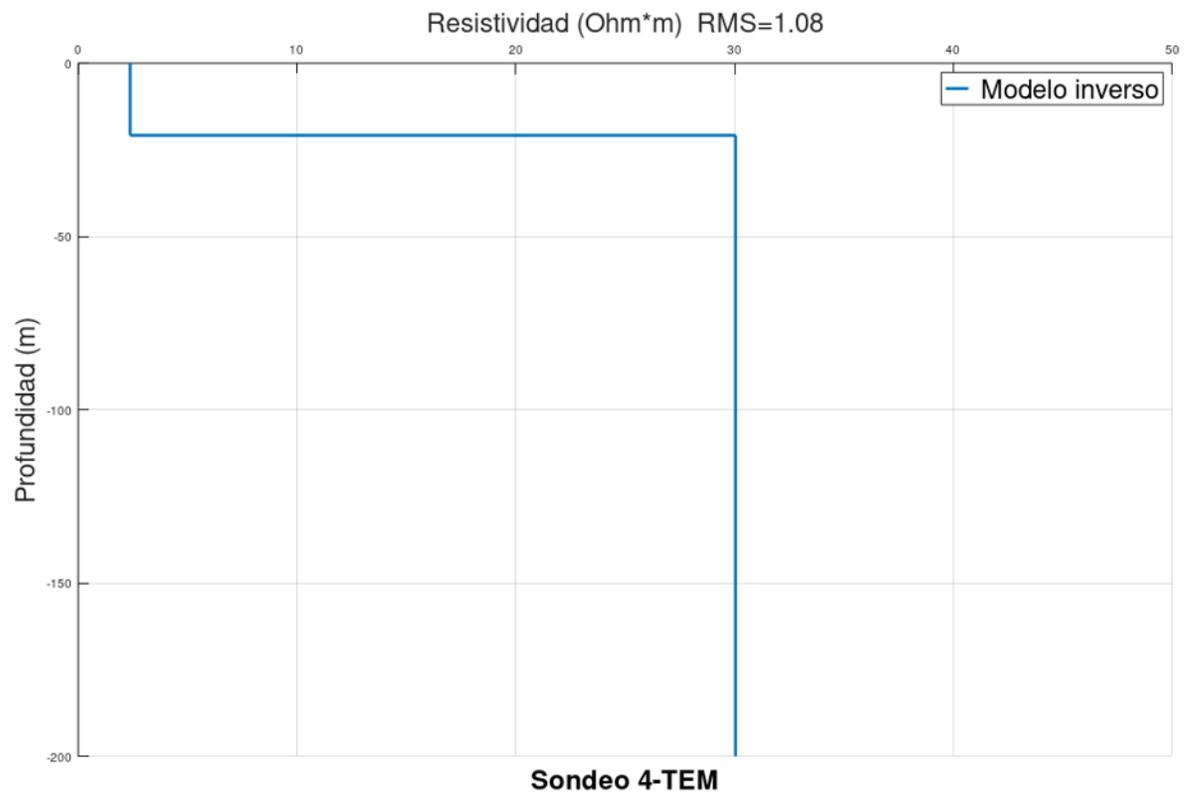


Figura 37. Modelo 1D del sondeo TEM 4 para el Perfil A.

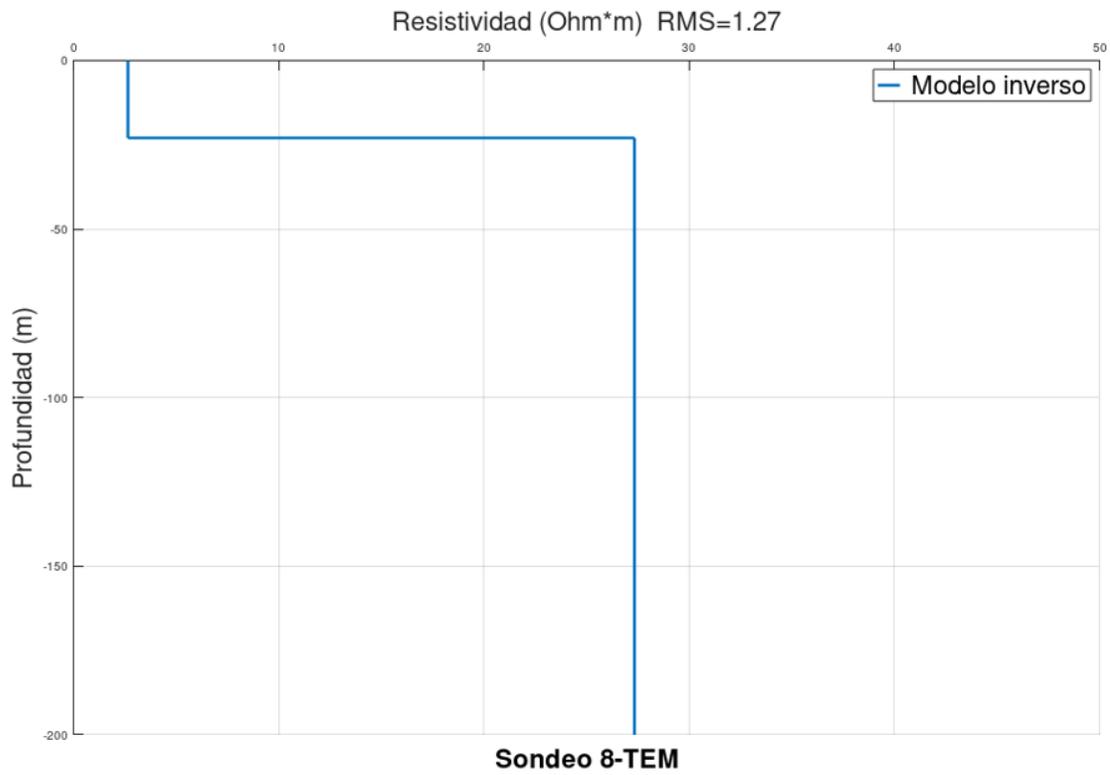


Figura 38. Modelo 1D del sondeo TEM 8 para el Perfil A.

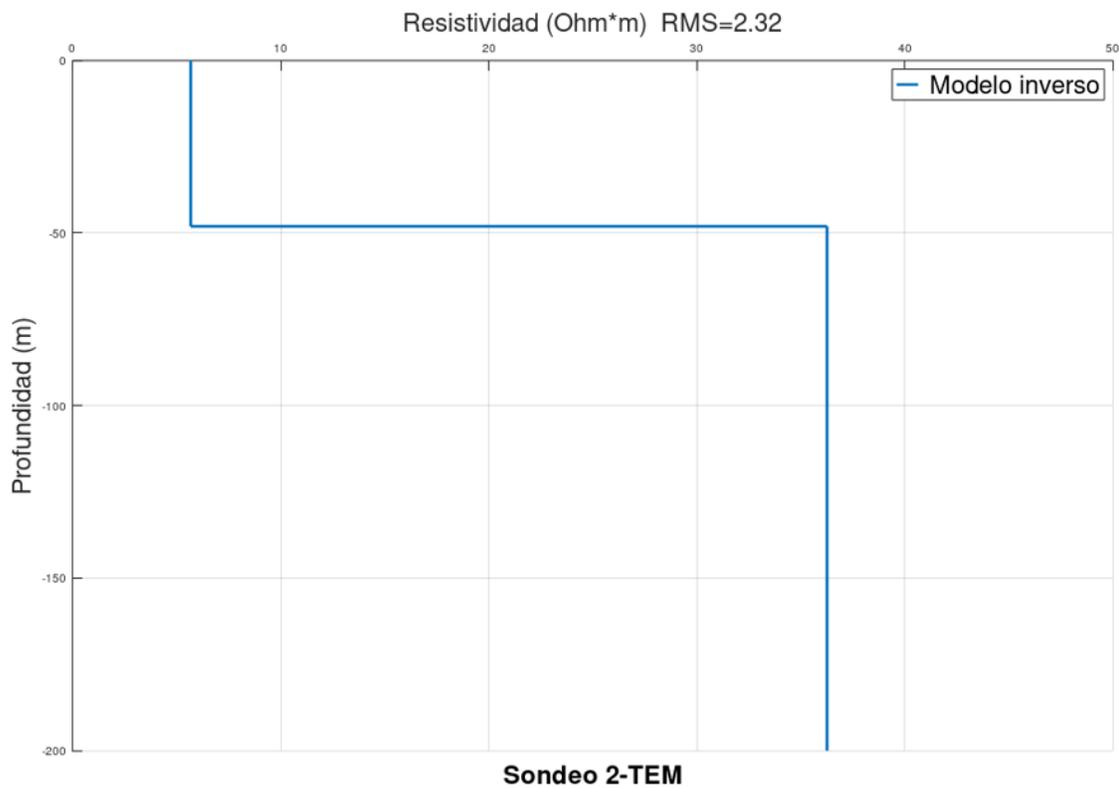


Figura 39. Modelo 1D del sondeo TEM 2 para el Perfil B.

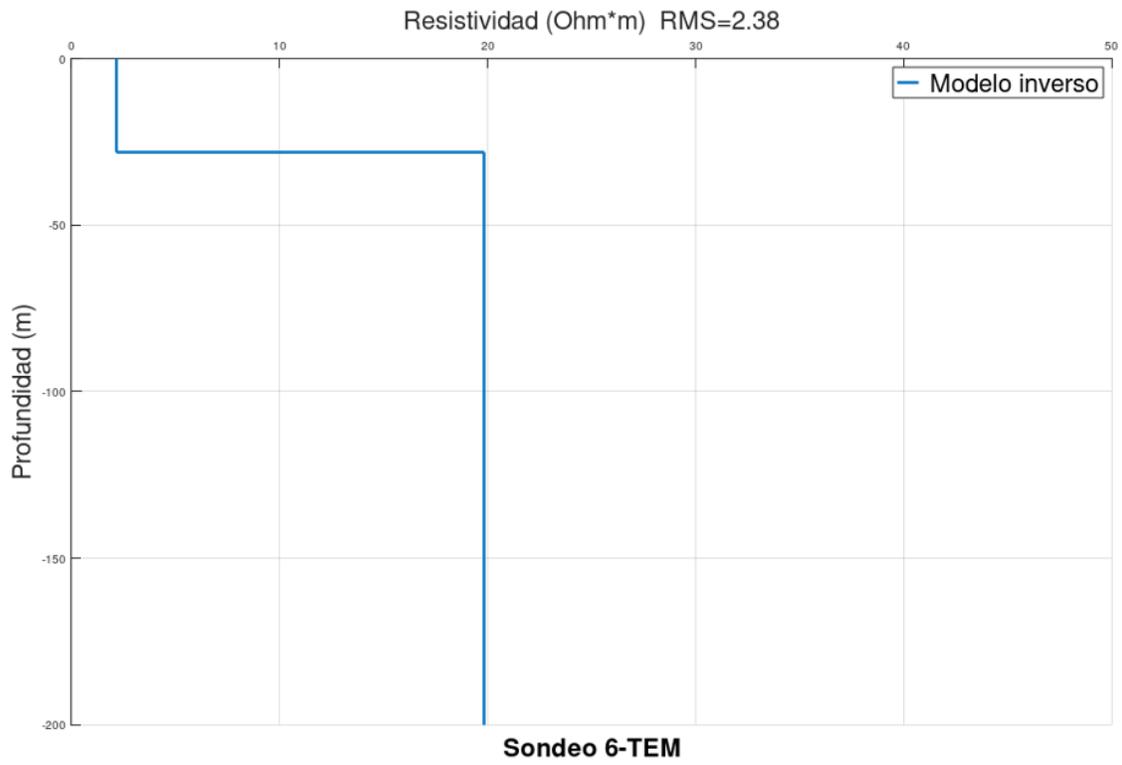


Figura 40. Modelo 1D del sondeo TEM 6 para el Perfil B.

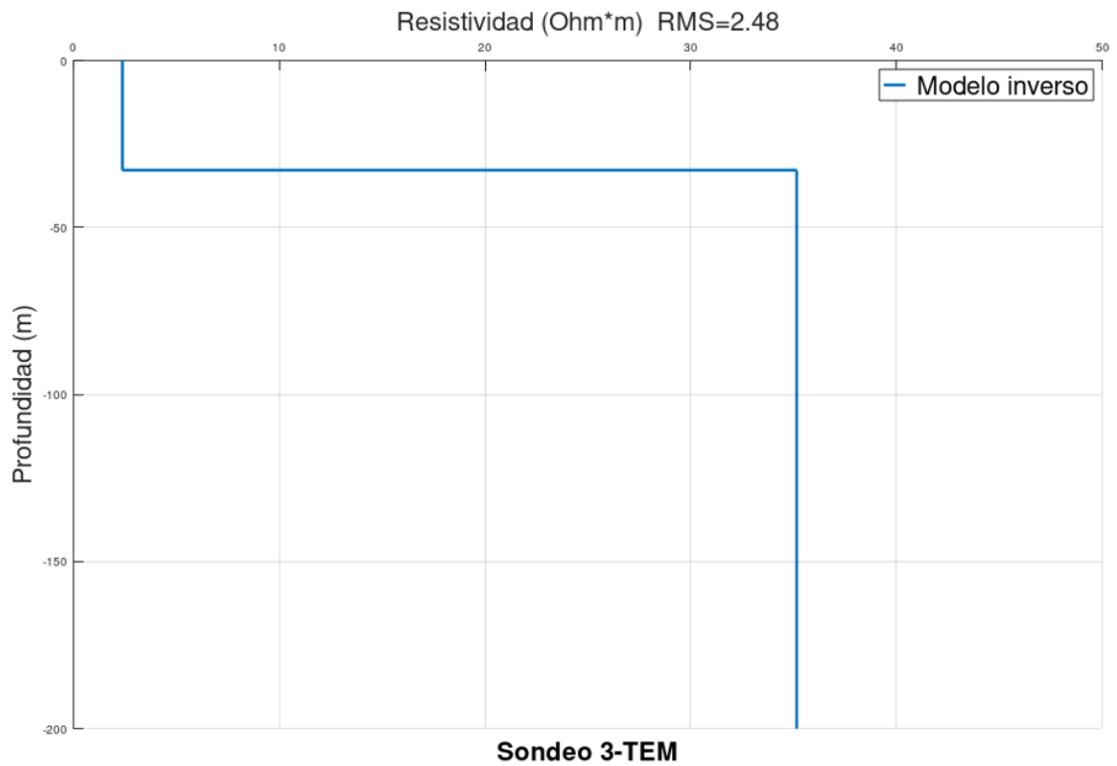


Figura 41. Modelo 1D del sondeo TEM 3 para el Perfil B.

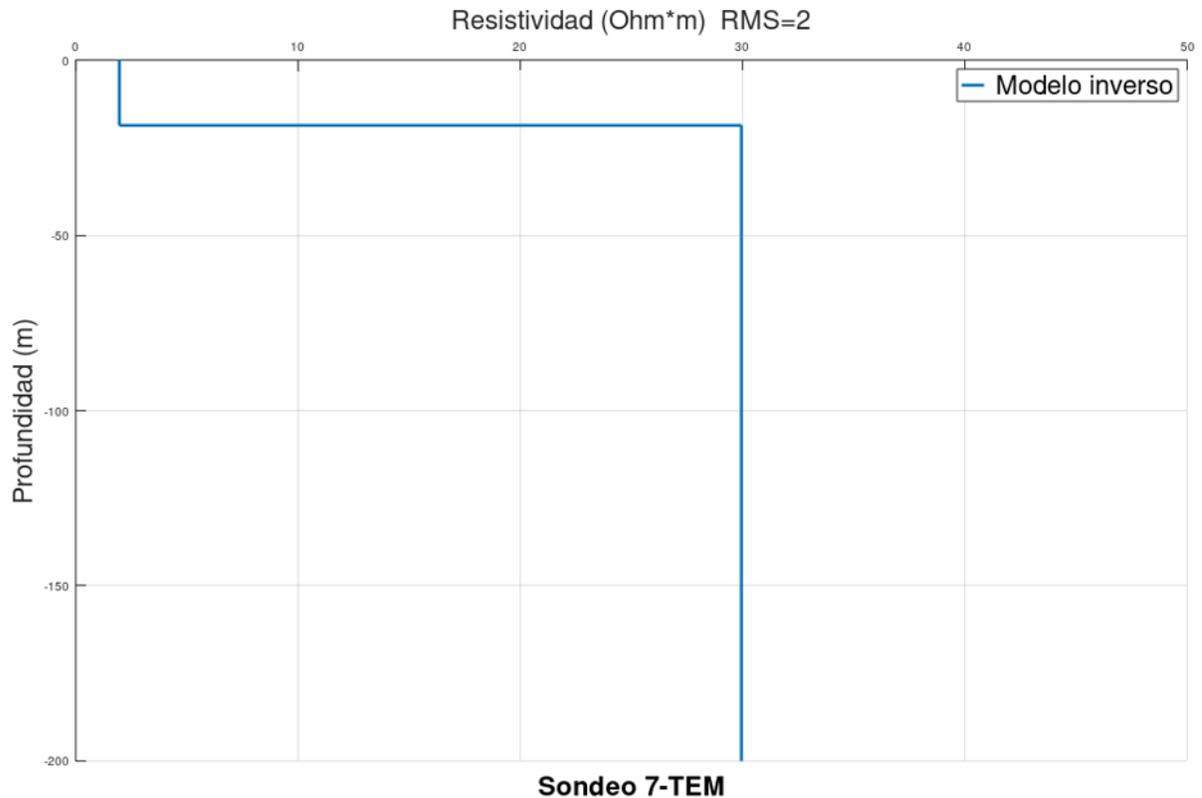


Figura 42. Modelo 1D del sondeo TEM 7 para el Perfil B.

Los resultados para las inversiones de los sitios TEM dejan ver el efecto de polarización inducida (PI). En el Capítulo 2 se describió la teoría de este fenómeno, de tal forma que en los datos se manifiesta como voltajes negativos mientras que en los gráficos podremos observar una inflexión debido a que estos datos negativos no pueden ser graficados en la escala logarítmica. Las Figuras 27 a 34 muestran esta inflexión característico del efecto del polarización inducida, para el Perfil A el efecto de PI esta presente desde tiempos tempranos a tardíos, mientras que para el Perfil B sucede lo contrario, es decir, de tiempos tardíos a tempranos.

Solo en la primer capa la resistividad es dispersiva, es decir, depende de la frecuencia de acuerdo con un modelo de Cole-Cole. Se adoptó este tipo de modelo para que éste fuera lo más sencillo posible. Posteriormente, en las pruebas realizadas con un modelo 3D se pudo comprobar la presencia de tres capas, una conductora, una de mediana resistividad y una muy resistiva. Asociando así el efecto de PI únicamente a la primer capa conductora.

5.2. Inversión de datos AMT 1D

Como parte de la inversión de datos AMT 1D, se utilizaron las técnicas de inversión de Occam y Marquard. De acuerdo con Groot-Hedlin y Constable (1990) Occam tiene la ventaja de generar modelos suavizados y evitar una sobreinterpretación de los datos, el método se centra en un semi espacio estratificado donde la matriz de rugosidad es definida en términos de su primera y segunda derivada de la resistividad eléctrica con respecto a la profundidad. Occam nos permitió obtener mediante la elección de un modelo inicial los modelos con rugosidad 1 y rugosidad 2, los cuales nos permitieron estimar los parámetros iniciales para el modelo de Marquard.

Resulta importante mencionar que los modelos iniciales propuestos muestran un buen ajuste para cada uno de los datos observados (ver Figuras 47 a 54); por tanto, podremos definir los modelos iniciales para Marquard y verificar su respectivo ajuste. Es de suma importancia realizar más de una propuesta de modelo inicial ya que como recordaremos Occam únicamente nos permite dar un estimado del modelo inicial sin embargo, esto no garantiza que sea la única solución.

A continuación se muestran los modelos resultantes para la inversión de datos AMT. Las Figuras 43 y 46 muestran en color rojo el modelo final (inverso) de Marquard, en color verde y negro se muestra los modelos de Occam de rugosidad 1 y 2 respectivamente y en color gris los modelos equivalentes los cuales nos ayudan a determinar la variabilidad de los parámetros del modelo, es decir, si los modelos equivalentes muestran una variabilidad alta podríamos decir que el parámetro no está bien resuelto sin embargo, si la variabilidad es baja el parámetro podrá ser considerado como bien resuelto.

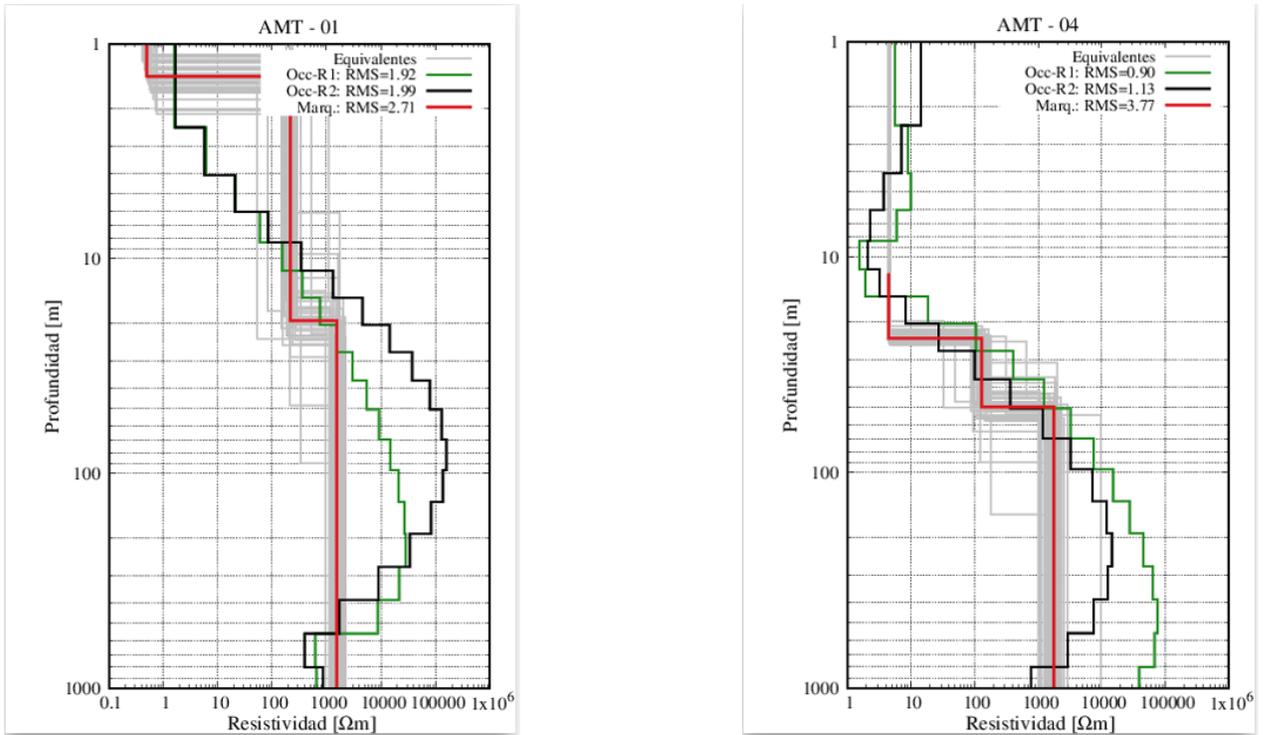


Figura 43. Resultados de inversión 1D para sondeos AMT 1 y 4 del Perfil A.

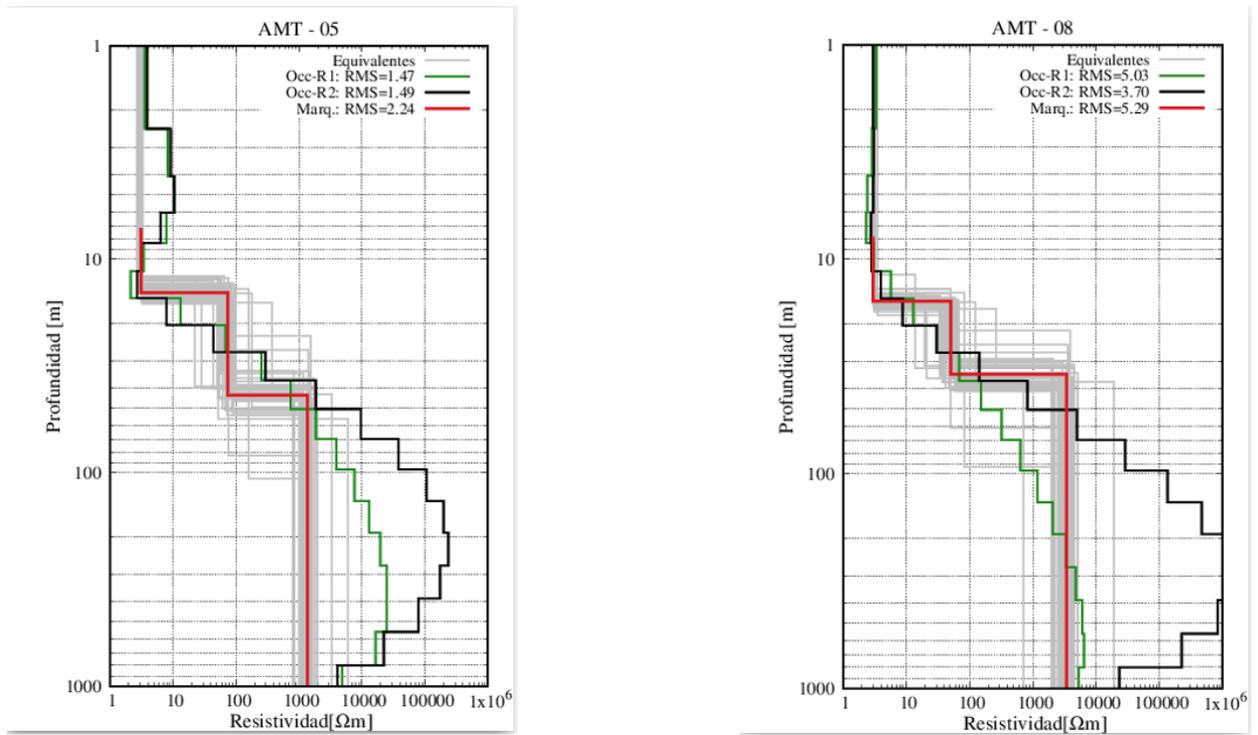


Figura 44. Resultados de inversión 1D para sondeos AMT 5 y 8 del Perfil A.

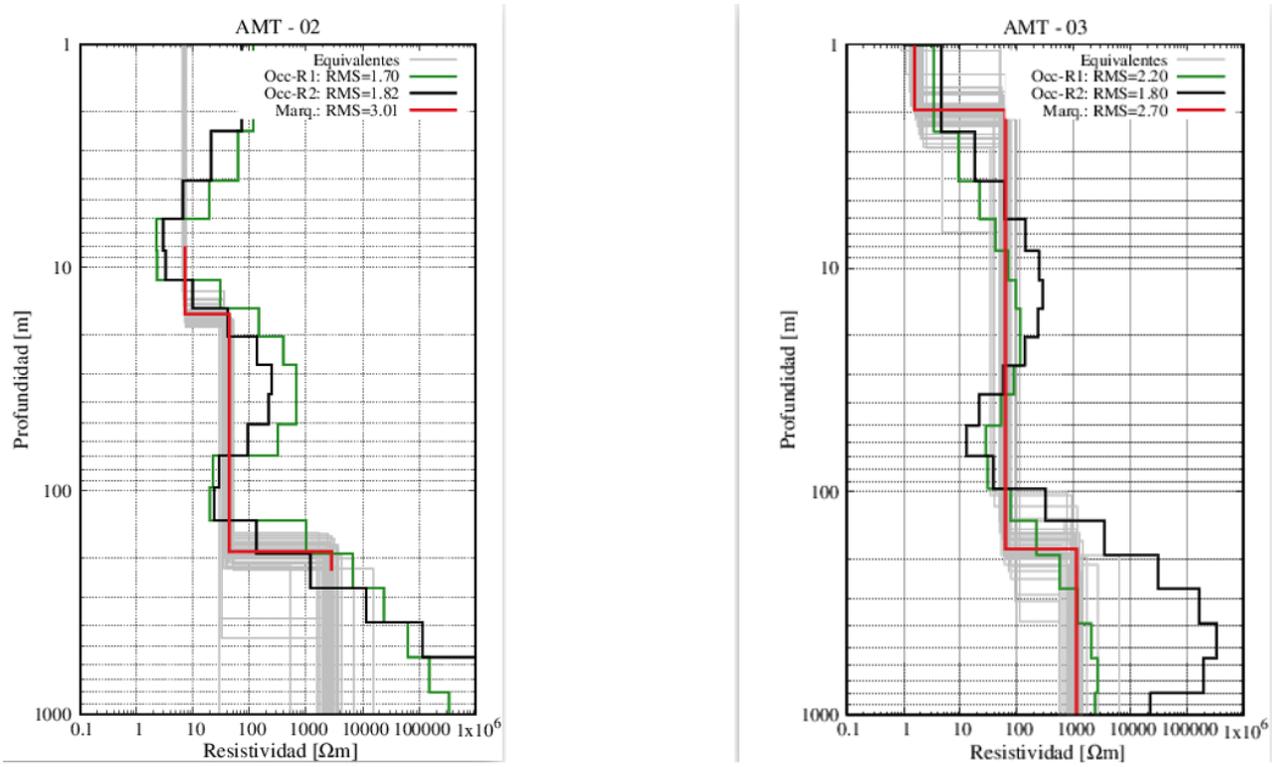


Figura 45. Resultados de inversión 1D para sondeos AMT 2 y 3 del Perfil B.

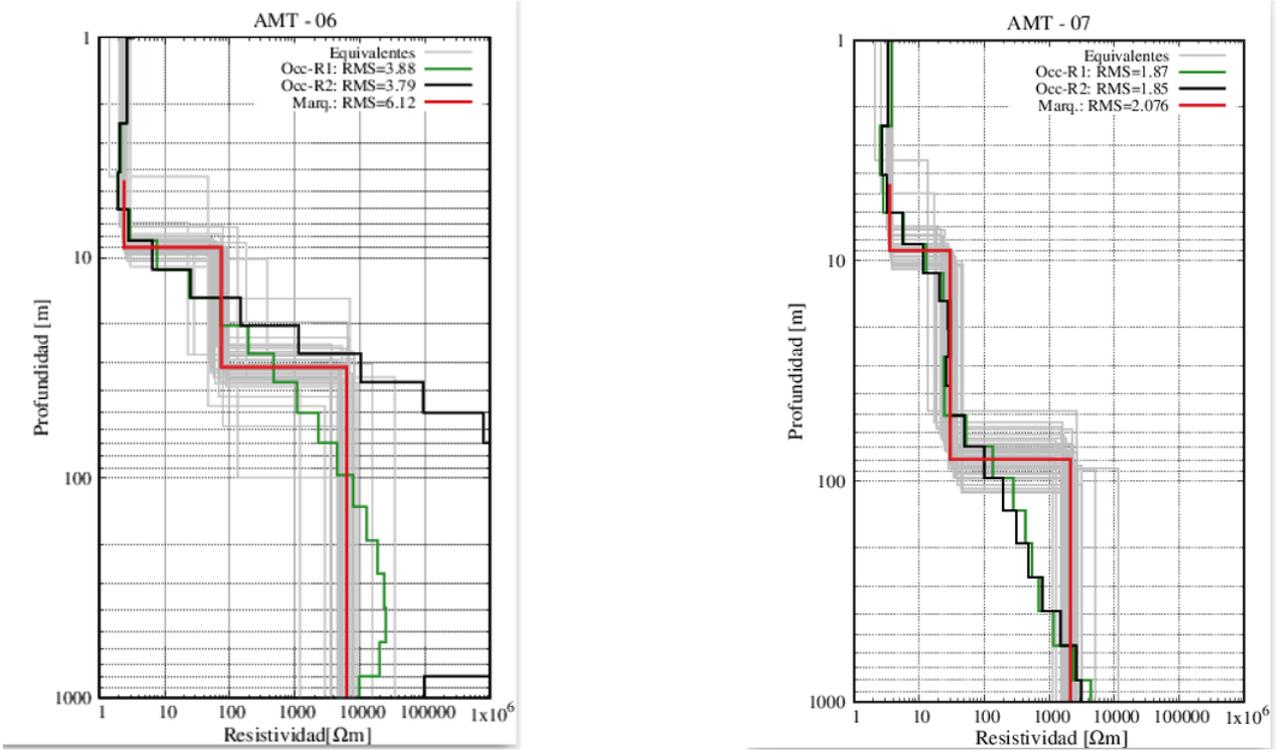


Figura 46. Resultados de inversión 1D para sondeos AMT 6 y 7 del Perfil B.

Para cada uno de los sitios AMT se buscó el mejor modelo inicial a partir del análisis de los resultados obtenidos de Occam con rugosidad 1 y 2. Se establecieron tres capas, una primer capa con valores de resistividad entre los 2 y 4 ohm-m, una segunda capa de resistividad media con valores entre los 50 y 120 ohm-m, y una tercer capa resistiva con valores entre los 1000 y 2000 ohm-m.

El modelo final (Marquard) para cada uno de los sitios AMT en cada perfil presenta un buen ajuste de los datos y suavidad en los modelos mostrando valores de RMS bajos, sin embargo, el modelo resultante parece no tener un buen ajuste a los datos (alta variabilidad en los modelos equivalentes). Esto posiblemente debido a que las curvas observadas no contaban con suficientes datos. Las Figuras 47 y 54 muestran con más detalle este comportamiento, en donde se muestra para cada uno de los perfiles en color azul los datos observados, en azul la respuesta del modelo de Occam de rugosidad 1, en rojo la respuesta del modelo de Occam de rugosidad 2 y en amarillo la respuesta del modelo de Marquard. El sondeo AMT 3 perteneciente al Perfil B (Figura 45) es un claro ejemplo de la falta de datos observados mostrados en el centro de la curva haciendo que el modelo correspondiente tenga una variabilidad alta al menos para la primer capa.

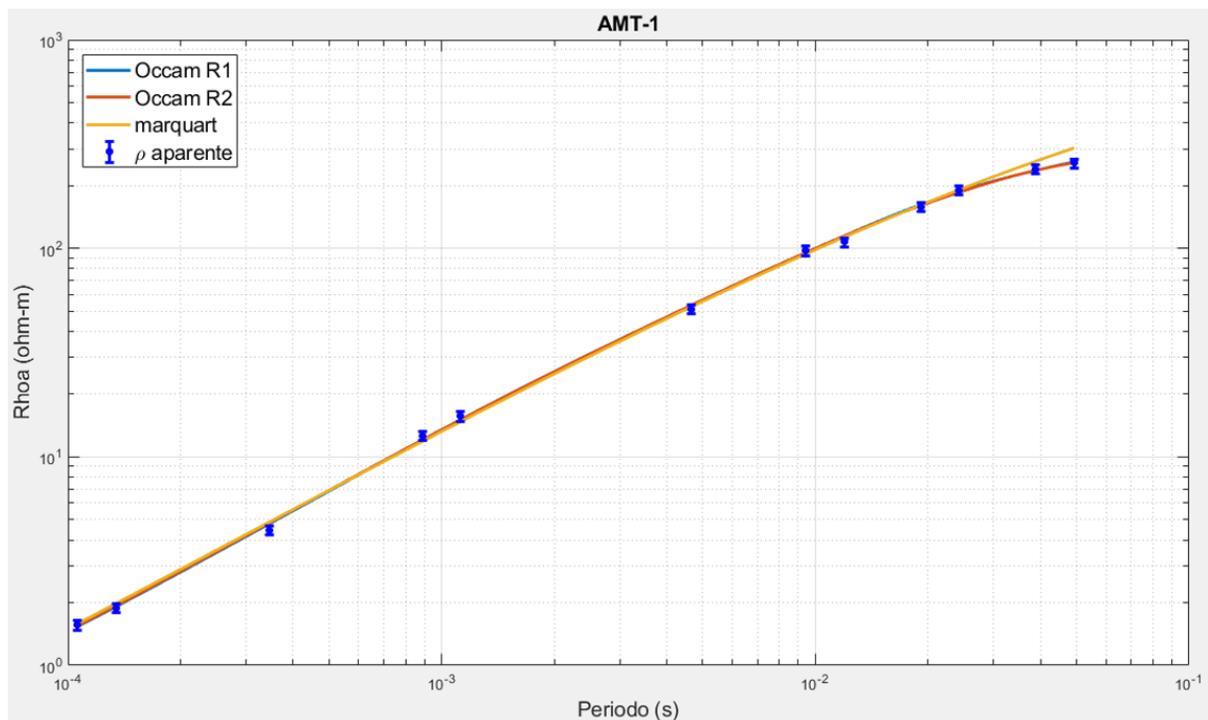


Figura 47. Modelo Sintético del sondeo AMT 1 para el Perfil A.

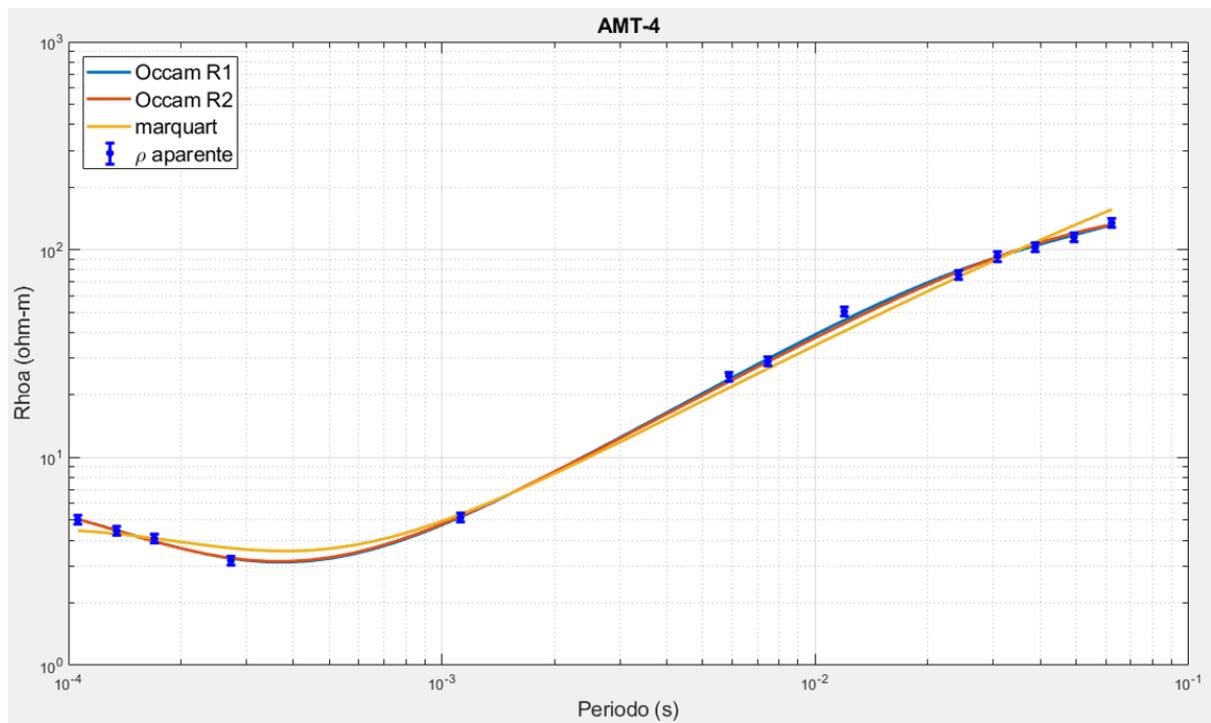


Figura 48. Modelo Sintético del sondeo AMT 4 para el Perfil A.

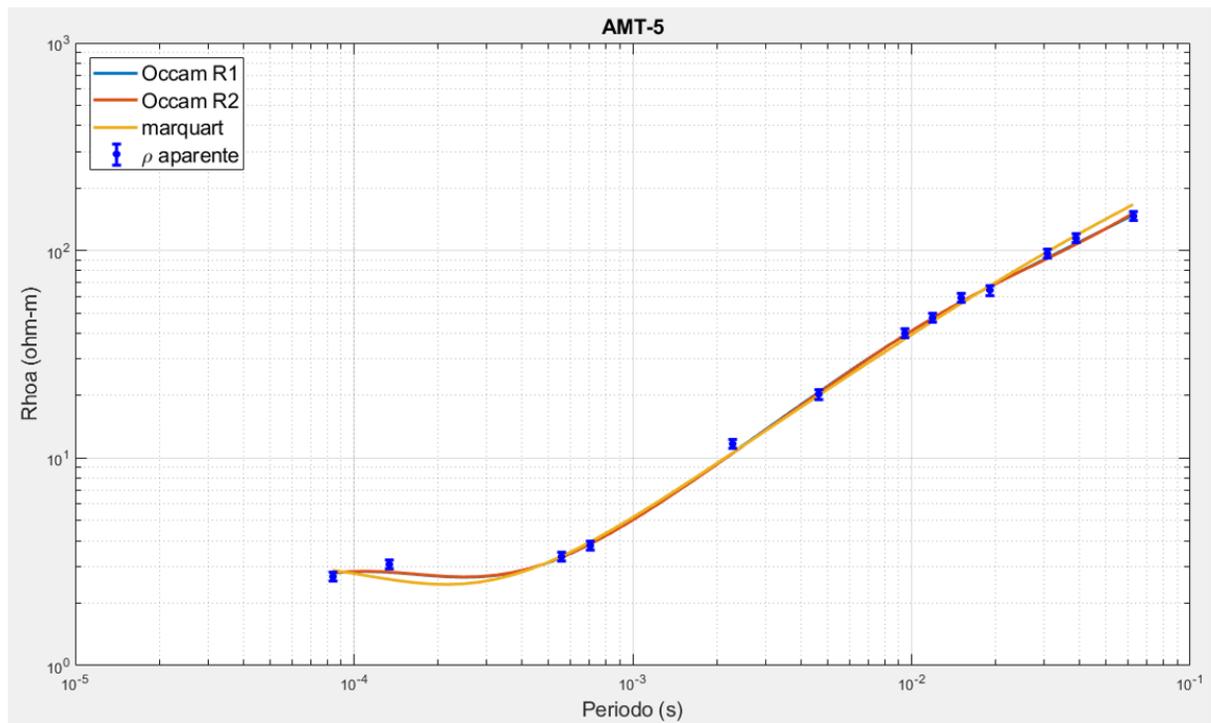


Figura 49. Modelo Sintético del sondeo AMT 5 para el Perfil A.

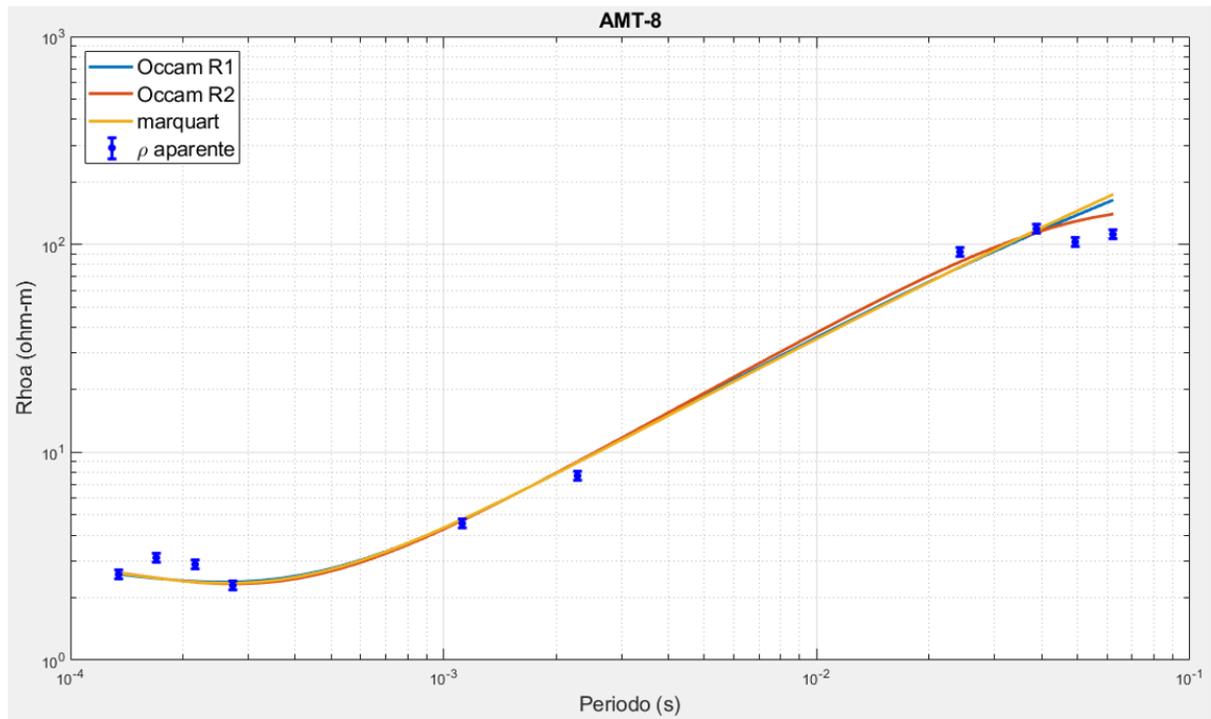


Figura 50. Modelo Sintético del sondeo AMT 8 para el Perfil A.

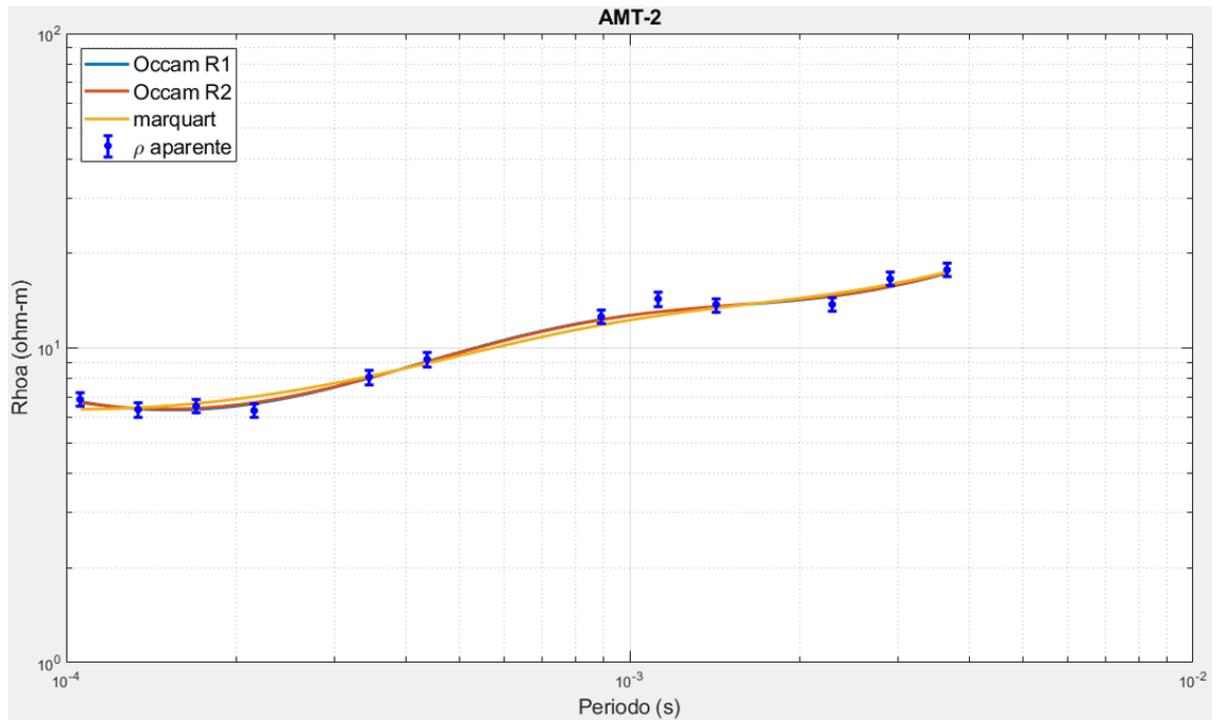


Figura 51. Modelo Sintético del sondeo AMT 2 para el Perfil B.

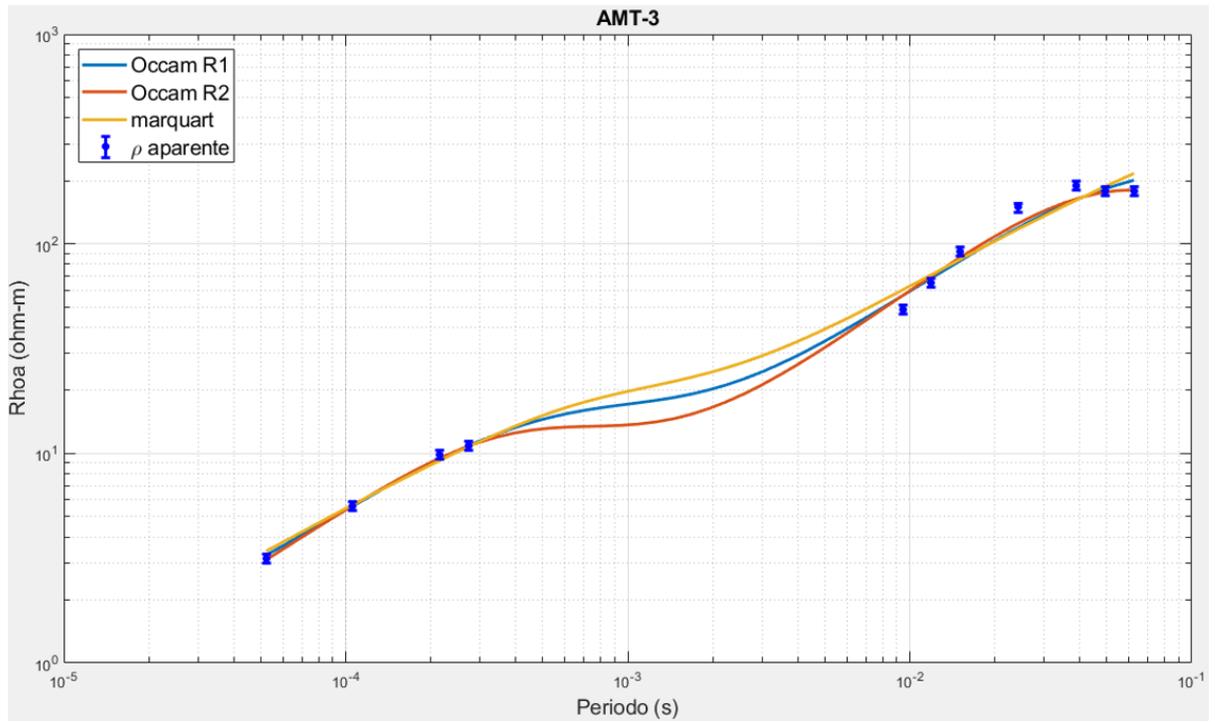


Figura 52. Modelo Sintético del sondeo AMT 3 para el Perfil B.

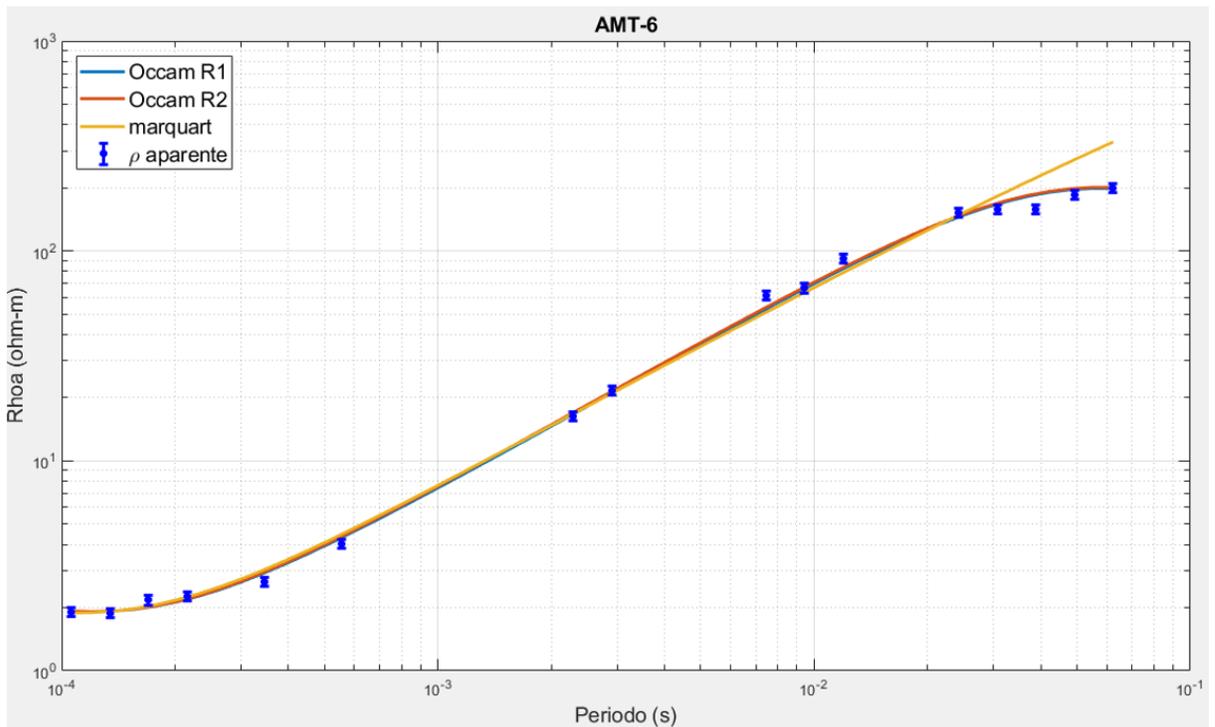


Figura 53. Modelo Sintético del sondeo AMT 6 para el Perfil B.

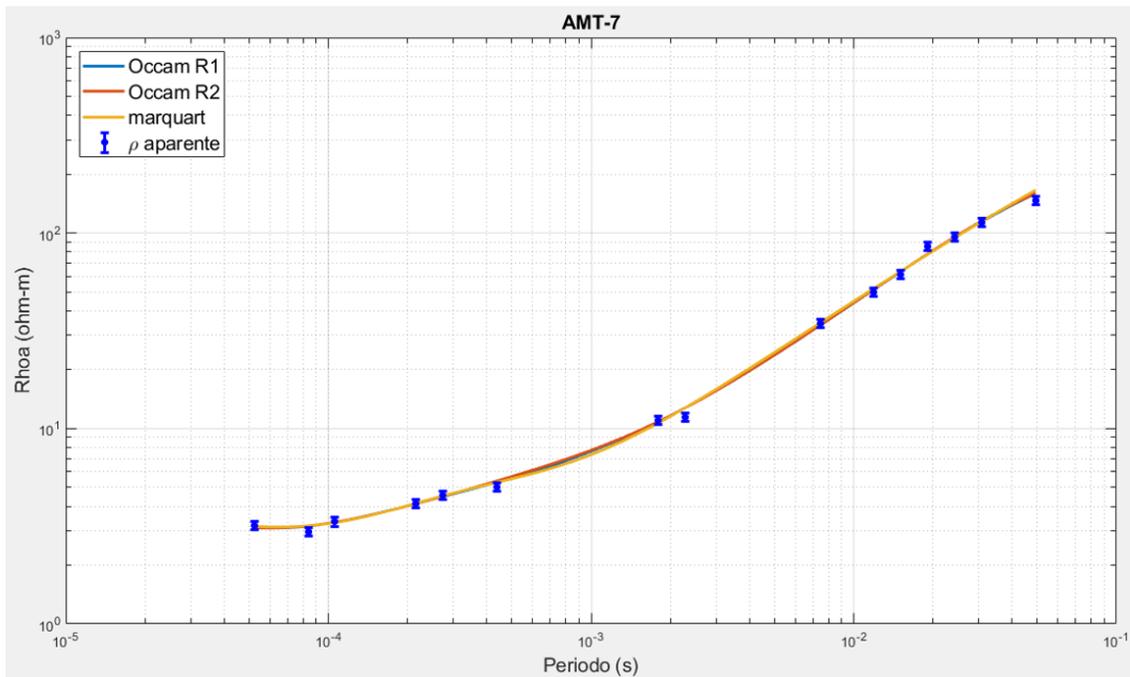


Figura 54. Modelo Sintético del sondeo AMT 7 para el Perfil B.

5.3. Inversión de datos AMT 3D

Como parte de la inversión de datos AMT en 3D se creó un modelo con un dominio de 14 celdas en dirección x y 8 celdas en dirección y; con una dimensión de 20 m para cada uno de ellas. Se emplearon un total de 31 capas con un espesor inicial para la primer capa de 0.5 m con un incremento logarítmico conforme aumenta la profundidad con un factor de 1.2. El dominio se extiende fuera del área de interés por 0.8 km y en la profundidad hasta 4.8 km para evitar efectos numéricos causados por los bordes del modelo.

Se realizaron pruebas con 4 modelos iniciales: 10, 30, 50 y 100 ohm-m. Para cada uno de ellos se realizó la inversión y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 2. Tabla de RMS para los distintos modelos iniciales.

| | 10 ohm-m | 30 ohm-m | 50 ohm-m | 100 ohm-m |
|-------------|----------|----------|----------|-----------|
| RMS inicial | 12.32 | 21.80 | 29.72 | 45.03 |
| RMS final | 5.92 | 5.06 | 4.09 | 4.77 |

La Tabla 2 muestra los valores de RMS para cada uno de los modelos iniciales

propuestos. En ella podemos observar que el modelo de 50 ohm-m muestra el RMS más pequeño, esto influye en la convergencia del proceso de inversión a una solución más confiable.

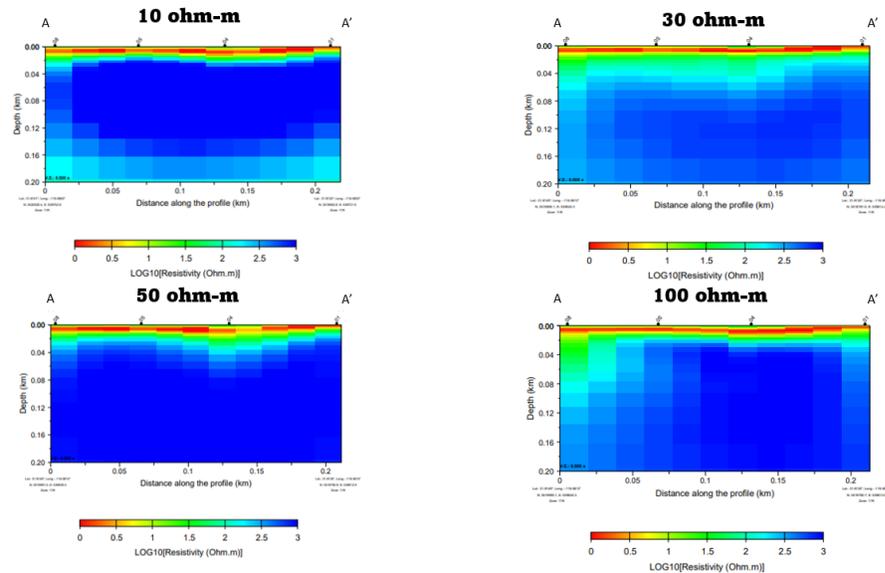


Figura 55. Resultados de las inversiones a partir de los modelos iniciales para el perfil A.

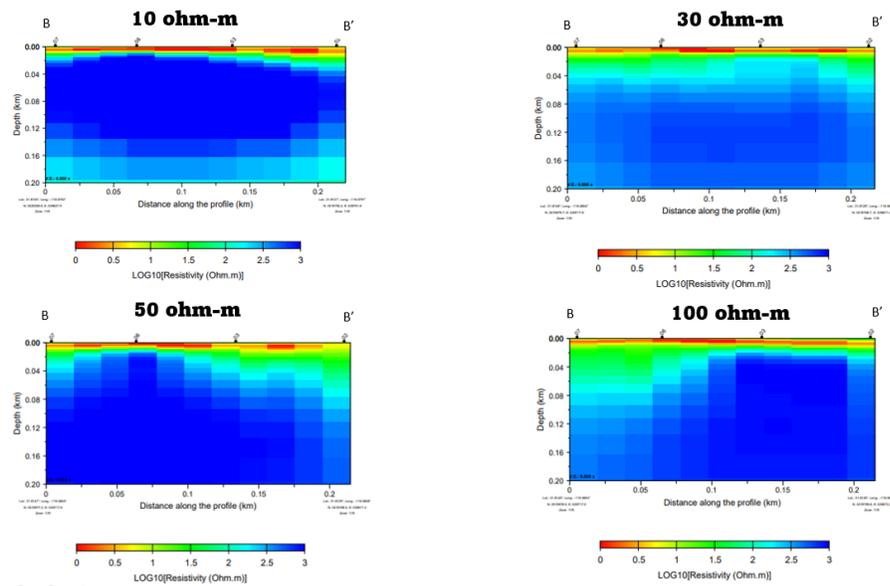


Figura 56. Resultados de las inversiones a partir de los modelos iniciales para el perfil B.

Las Figuras 55 y 56 muestra los resultados de la inversión para cada uno de los modelos iniciales para cada perfil. En ambas figuras podemos observar que cada modelo

muestra la presencia de una capa conductora (color rojo), una capa de mediana resistividad (color verde) y una capa resistiva (color azul). El modelo de 50 ohm-m muestra tener mejor definición entre las capas lo cual corresponde con tener un menor RMS.

A partir de estos resultados preliminares se realizaron distintas pruebas con la finalidad de obtener un modelo mejorado en el cual se incluyeron los resultados de los datos TEM y AMT fijando una, dos y tres capas en el modelo inicial para posteriormente realizar la inversión. De acuerdo con las pruebas realizadas asignando información a priori al modelo inicial, los resultados de este experimento no fueron buenos tanto en los ajustes como en los modelos obtenidos, por lo que el modelo inicial homogéneo de 50 ohm-m es el que consideramos que tiene mejor definición de la resistividad en cada capa y explica mejor el conjunto de datos.

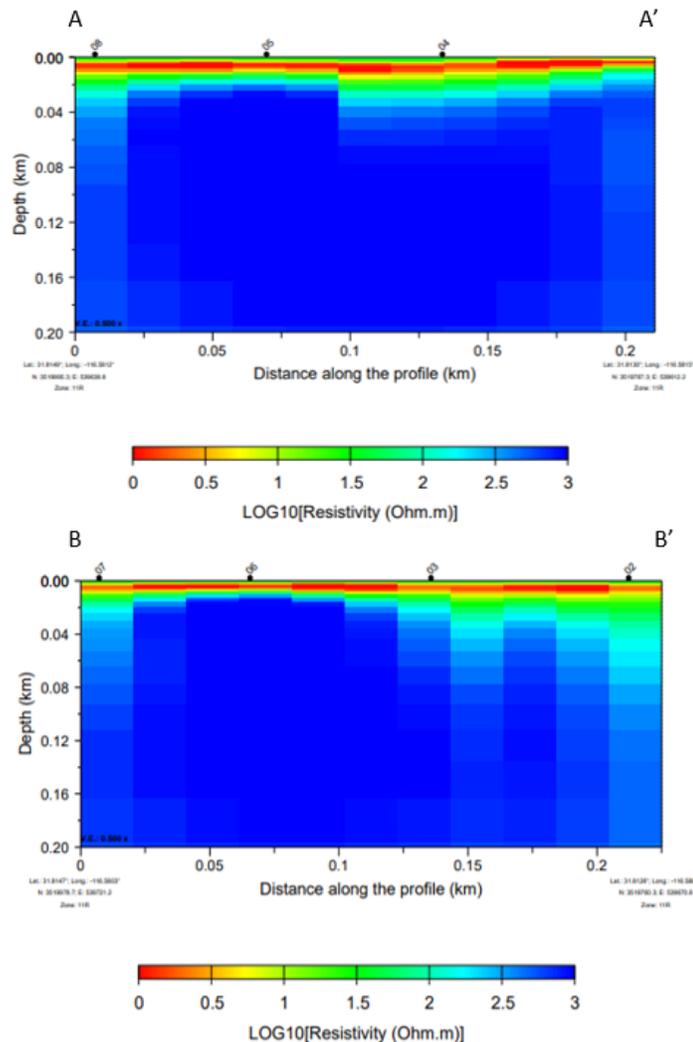


Figura 57. Modelo final.

La Figura 57 muestra el modelo óptimo en 3D como resultado de la inversión de datos AMT. En él se puede apreciar, para cada uno de los perfiles, la presencia de una capa conductora en color rojo, una segunda capa de mediana resistividad en color verde y una tercer capa resistiva en color azul.

La Figura 58 muestra un ejemplo de los ajustes de las curvas de resistividad aparente y fase para los sitios 4 y 5. En color rojo se muestra la componente Z_{xy} y en color azul la componente Z_{yx} , los puntos representan los datos observados en campo con su respectivo error mientras que las líneas continuas los ajustes. Ambos sitios muestran la tendencia de una capa conductora hacia una capa resistiva. (visitar el Capítulo de Anexo para visualizar el resto de los ajustes).

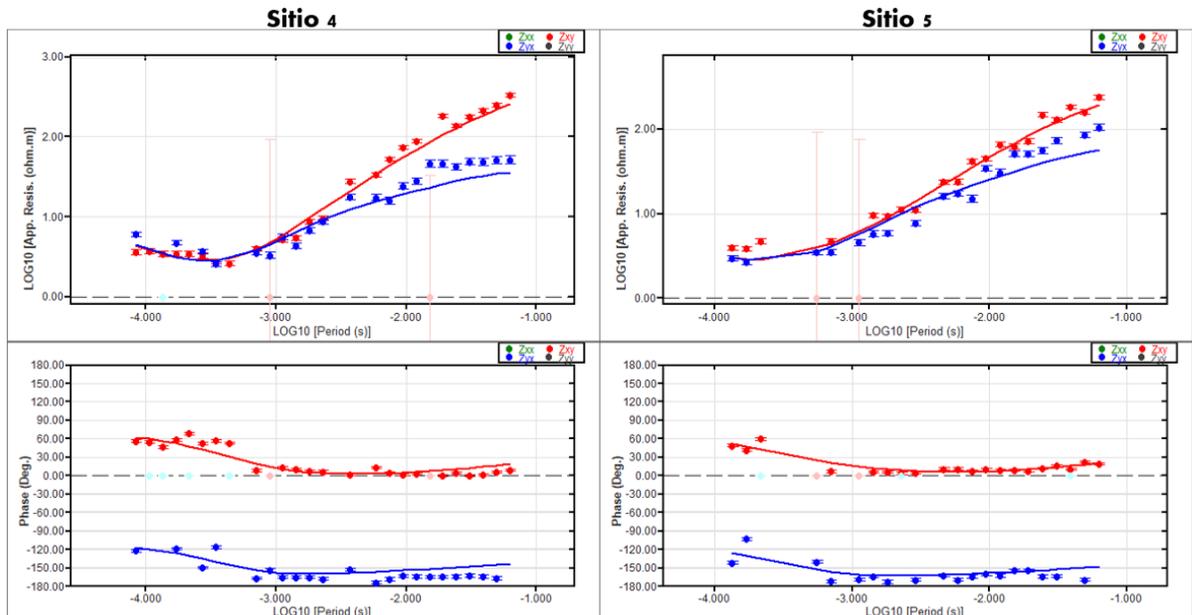


Figura 58. ajustes finales sitio 4 y 5.

Capítulo 6. Discusión e Interpretación de Resultados

El presente capítulo muestra la discusión e interpretación de resultados obtenidos en este trabajo de investigación partiendo del objetivo principal, el cual fue explorar y caracterizar el sitio de estudio mediante la aplicación de métodos electromagnéticos (TEM y AMT).

6.1. Discusión de Resultados

El haber trabajado con modelos en 1D y 3D nos permitió encontrar el modelo geoelectrico óptimo. Tras varias pruebas realizadas con distintos modelos iniciales 3D, se eligió el modelo con menor RMS, el cual fue un semiespacio homogéneo de 50 ohm-m. El incluir resistividades y espesores a partir de los datos TEM en la inversión 3D de datos AMT, fijando una, dos y tres capas, no resultó ser una buena opción en este estudio ya que como se pudo observar en el Capítulo 5, las inversiones no lograron obtener modelos geoelectricos óptimos. De tal manera que el modelo geoelectrico óptimo (Figura 59) fue el modelo homogéneo de 50 ohm-m el cual desde el procesamiento de los datos 1D produjo modelos de tres capas, una primera asociada a una capa conductora, una segunda de mediana resistividad y una tercera muy resistiva; para cuando se realizó la inversión en 3D se observó el modelo óptimo.

Por otra parte, el efecto de la polarización inducida (PI), visualizado en el procesamiento de los datos TEM, presente en la capa conductora más somera, podría deberse a la composición del suelo, de clasificación aluvión, el cual, en su mayoría, contiene material poco consolidado principalmente arcillas, las cuales por su naturaleza son altamente polarizables ya que contienen cargas eléctricas en su estructura interna. A nivel macroscópico, este fenómeno se observa en superficie como un retardo en el decaimiento del potencial eléctrico una vez que la corriente eléctrica en superficie ha cesado, como fue el caso para los datos recabados en el sitio de estudio.

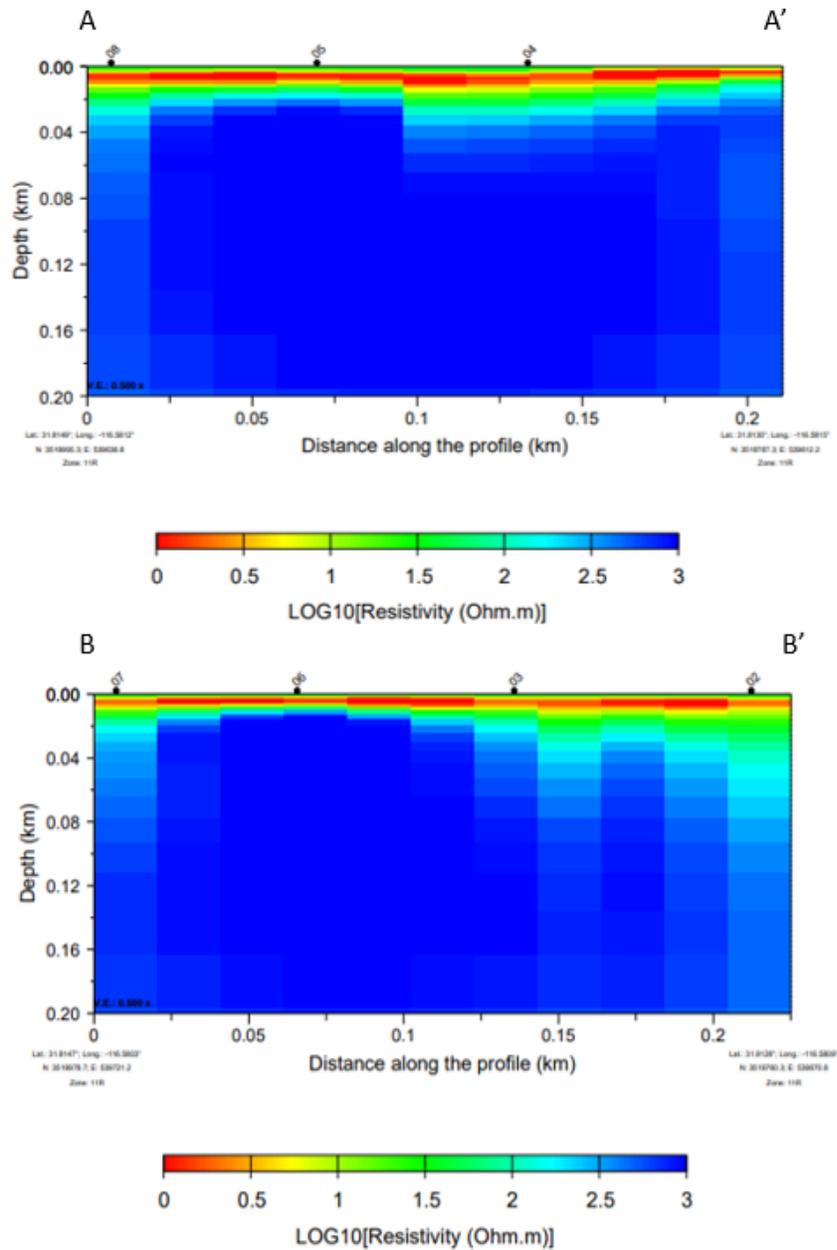


Figura 59. Modelo Óptimo para el Perfil A y B.

La problemática de la escasez de agua en el Municipio de Ensenada es y seguirá siendo un problema debido a la alta demanda y a la escasa recarga natural, en el presente trabajo se mostró la aplicación de dos métodos electromagnéticos (TEM y AMT), con las cuales se logró explorar y caracterizar el sitio de estudio. Desafortunadamente no fue posible detectar zonas que puedan albergar agua debido a que el sitio de estudio no cumplió con las características idóneas, es decir, con la exploración geofísica propuesta únicamente se llegó a determinar un modelo geológico compuesto

por tres capas siendo una de ellas de mediana resistividad eléctrica con valores comprendidos entre 10 y 60 ohm-m la cual pudiera albergar agua, sin embargo esta capa resultó ser de un espesor pequeño de tal forma que aunque exista agua entre los poros de la roca no es suficiente para poder definirla como un acuífero, más bien puede considerarse como un sitio más de recarga para los acuíferos que proveen a la Ciudad de Ensenada.

6.2. Interpretación de Resultados

Como parte complementaria para la interpretación se realizó un modelo digital de elevaciones para la Ciudad de Ensenada (Figura 60), en el cual se ubicó la zona de estudio. El modelo muestra información acerca de la topografía presente en la zona de estudio la cual contiene cerros con relieve abrupto, que de acuerdo a la geología de la zona, están constituidos principalmente por depósitos volcánicos. Además, se realizaron perspectivas del modelo digital de elevaciones. Por ejemplo, la perspectiva suroeste que muestra la zona de estudio como una depresión natural (valle) rodeada por tres cerros.

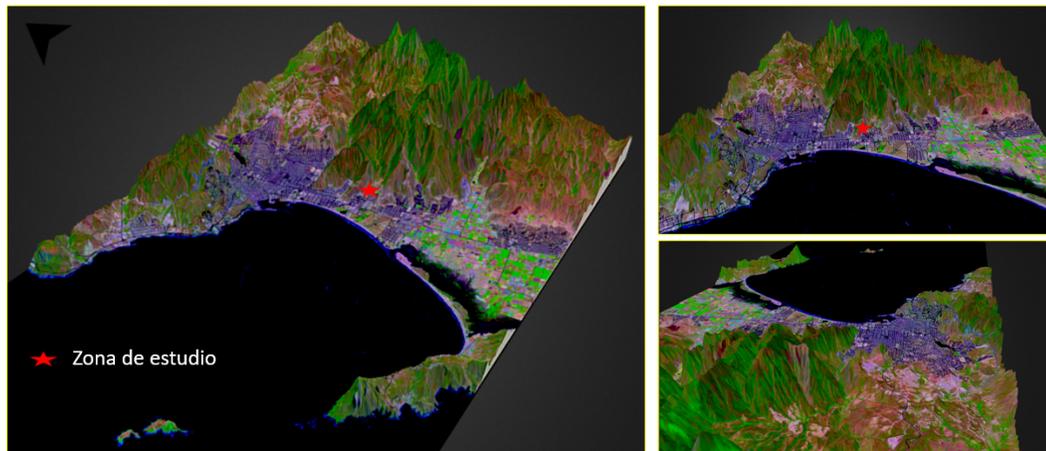


Figura 60. Modelo digital de elevación de Ensenada, Baja California. Elaboración propia <https://skfb.ly/o6YzW>.

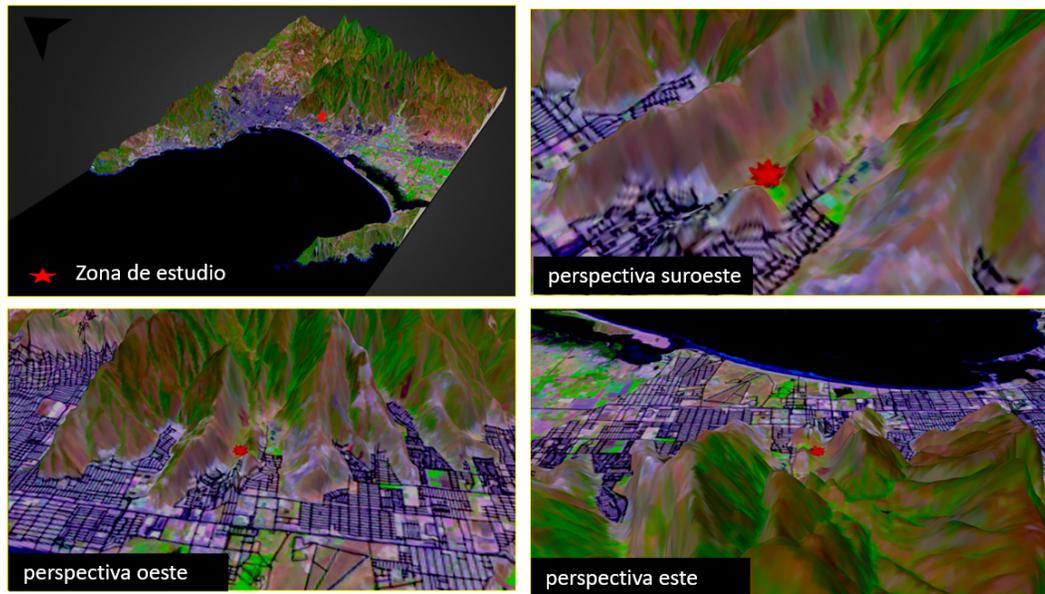


Figura 61. Perspectivas del modelo digital de elevación de Ensenada, Baja California. Elaboración propia <https://skfb.ly/o6YzW>.

A partir del procesamiento de los datos adquiridos de TEM y AMT, fue posible determinar imágenes del subsuelo 3D con las cuales se determinó la distribución de los valores de resistividad eléctrica, de esta manera se determinó una posible correlación geológica, descrita a continuación:

Capa 1:

- Ubicada en la parte superficial, presenta valores de resistividad eléctrica que varían en un rango de 1 a 6 ohm-m, su espesor oscila de 1 a 5 metros y se correlaciona con suelo aluvial y material no consolidado a poco consolidado, cuyo origen puede ser asociado procesos erosivos.

Capa 2:

- Subyace a la capa 1, con valores de resistividad eléctrica que oscilan en un rango de 10 a 60 ohm-m, su espesor varía de 5 a 25 metros y se correlaciona con andesita e intercalaciones de brecha andesítica.

Capa 3:

- Se encuentra por debajo de la capa 2 y muestra valores de resistividad eléctrica que oscilan en un rango de 300 a 1000 ohm-m. El espesor máximo observado conforme al alcance de exploración fue de 200 metros. Los materiales de esta capa se asocian a granodiorita con intercalaciones de tonalita.

La Figura 62 y 63 muestra el modelo geológico resultante para el Perfil A y B. La geología a la cual se hace referencia fue obtenida a partir de la observada en la carta geológica minera para el Municipio de Ensenada (Servicio Geológico Mexicano, 2003).

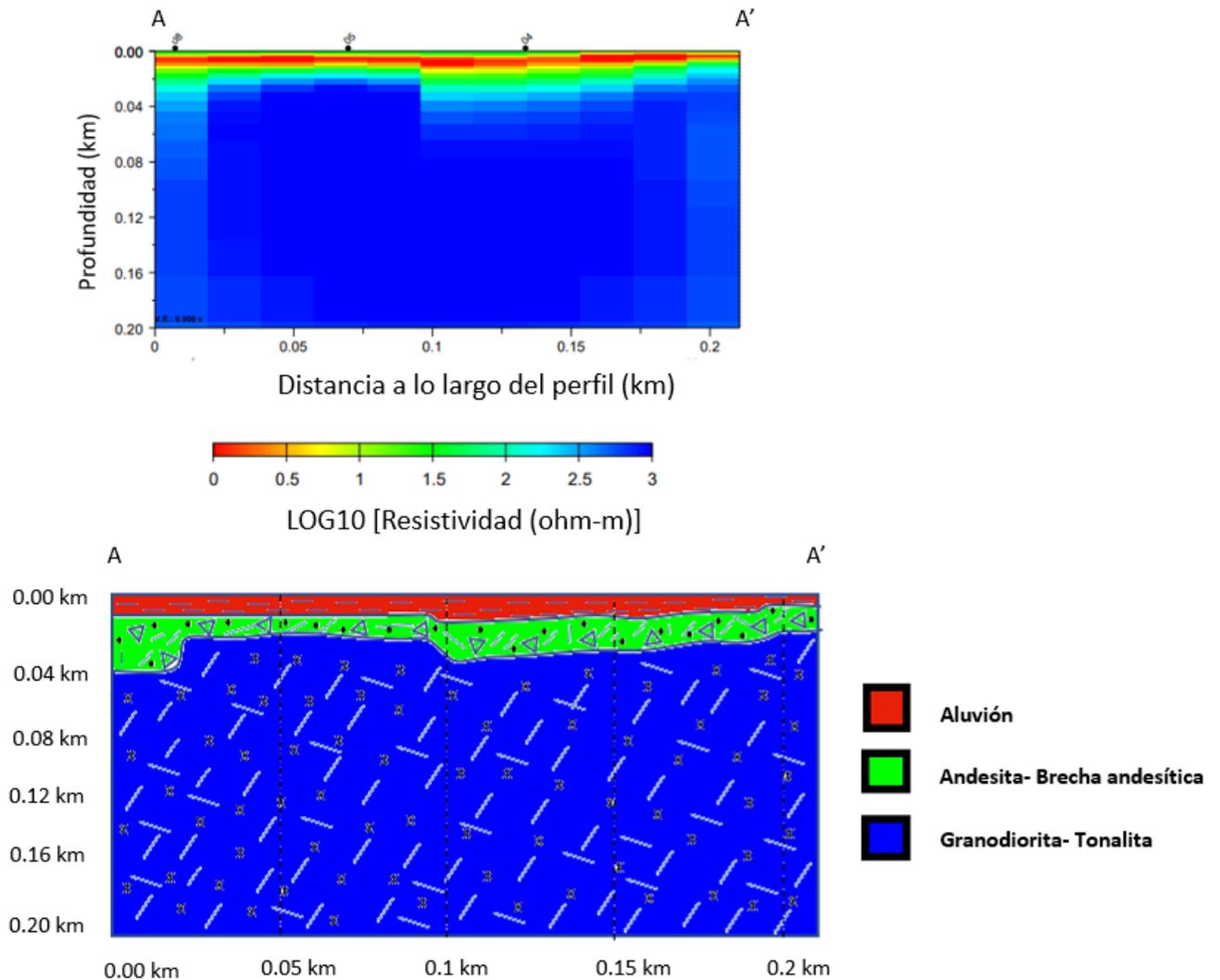


Figura 62. Modelo geol3gico para el Perfil A.

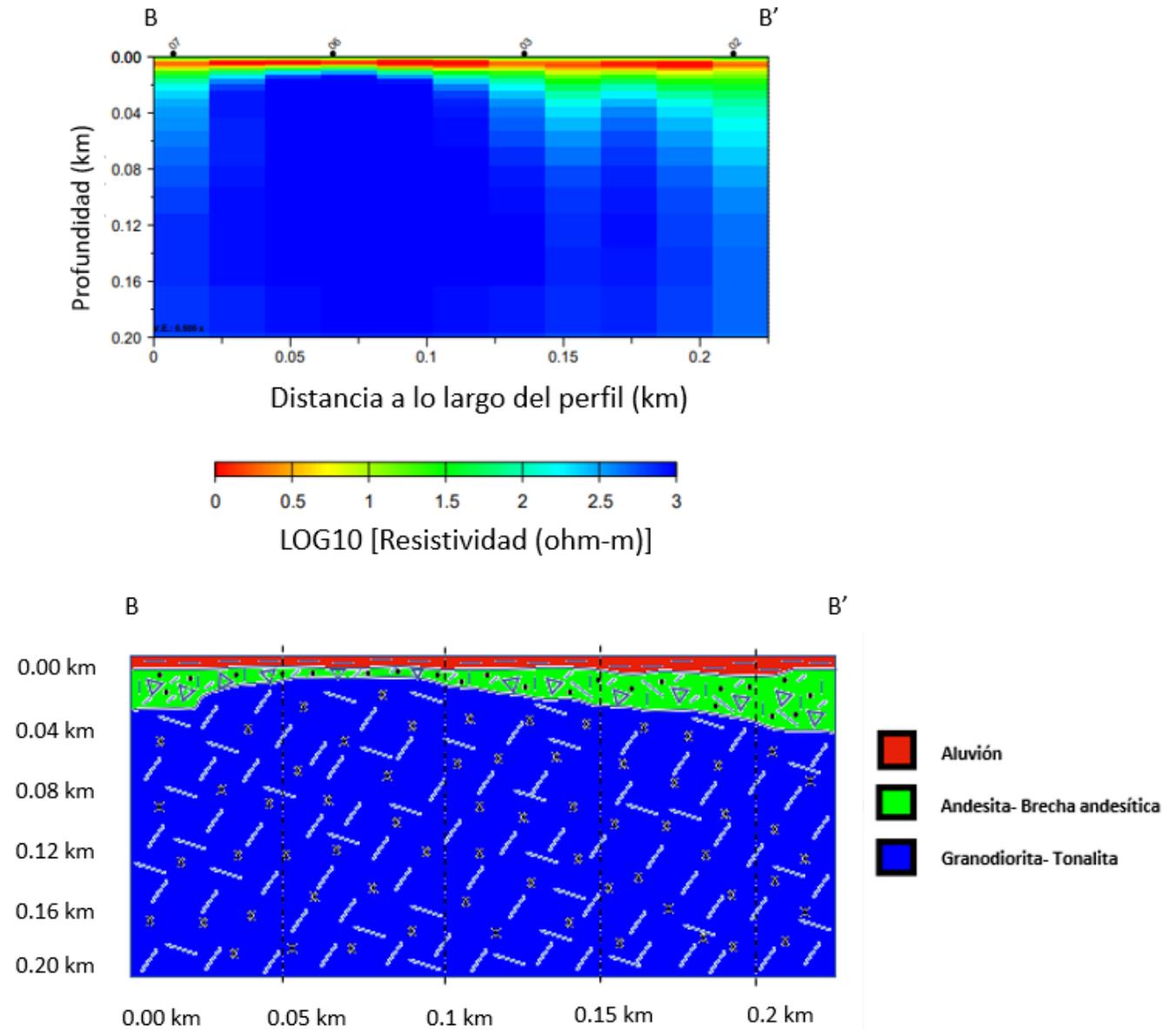


Figura 63. Modelo geológico para el Perfil B.

Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

El presente estudio resultó ser útil para conocer la situación hidrológica de la zona de estudio, así como una referencia importante para futuras investigaciones dentro del área. Se mostró la eficacia que tienen los métodos electromagnéticos en estudios hidrológicos, sin embargo, desafortunadamente no se logró acoplar ambas técnicas (TEM y AMT), aunque ambas contribuyeron al momento de elegir el modelo óptimo para la zona de estudio.

Fue posible asociar las tres capas del modelo geoelectrico óptimo con la geología existente en la zona de estudio, para ambos perfiles estudiados, lo cual nos ayudo a caracterizar el sitio de estudio. El modelo final indica la posible presencia de agua contenida entre los poros de la roca en la capa intermedia asociada a resistividades eléctricas comprendidas entre los 10 y 60 ohm-m con un espesor aproximado de 20 m, asociada a depósitos de andesita con intercalaciones de brecha andesítica.

Por otra parte, esta investigación también nos permitió comprender que esta zona tiene la función de recarga para el acuífero Maneadero ya que como se observó en el análisis del modelo digital de elevaciones, el sitio de estudio se encuentra rodeado de cerros, lo que permite que en temporada de lluvias el sitio reciba el escurrimiento ladera abajo en su camino. Es necesario realizar estudios complementarios para poder definir mejor las características de este sitio.

7.2. Recomendaciones

Debido a que no hay trabajos previos e información relevante, como lo son pozos cerca de la zona, es recomendable realizar más estudios, para corroborar los resultados mostrados en el presente trabajo, y así tener información geológica-geofísica en esta área de estudio.

Se recomienda ampliamente realizar estudios geofísicos en los alrededores del sitio de estudio especialmente al sur, como se muestra en la Figura 64, en la cual de acuer-

do con el modelo geológico actual se podrán conocer más características geológicas-geofísicas, que contribuyan en la recopilación de la información para la evaluación de la situación hídrica en el Municipio de Ensenada.

Por otra parte, es recomendable implementar nuevas técnicas geofísicas como lo son tomografías de resistividad eléctrica para poder tener un referente al momento de llevar a cabo la caracterización de un acuífero.

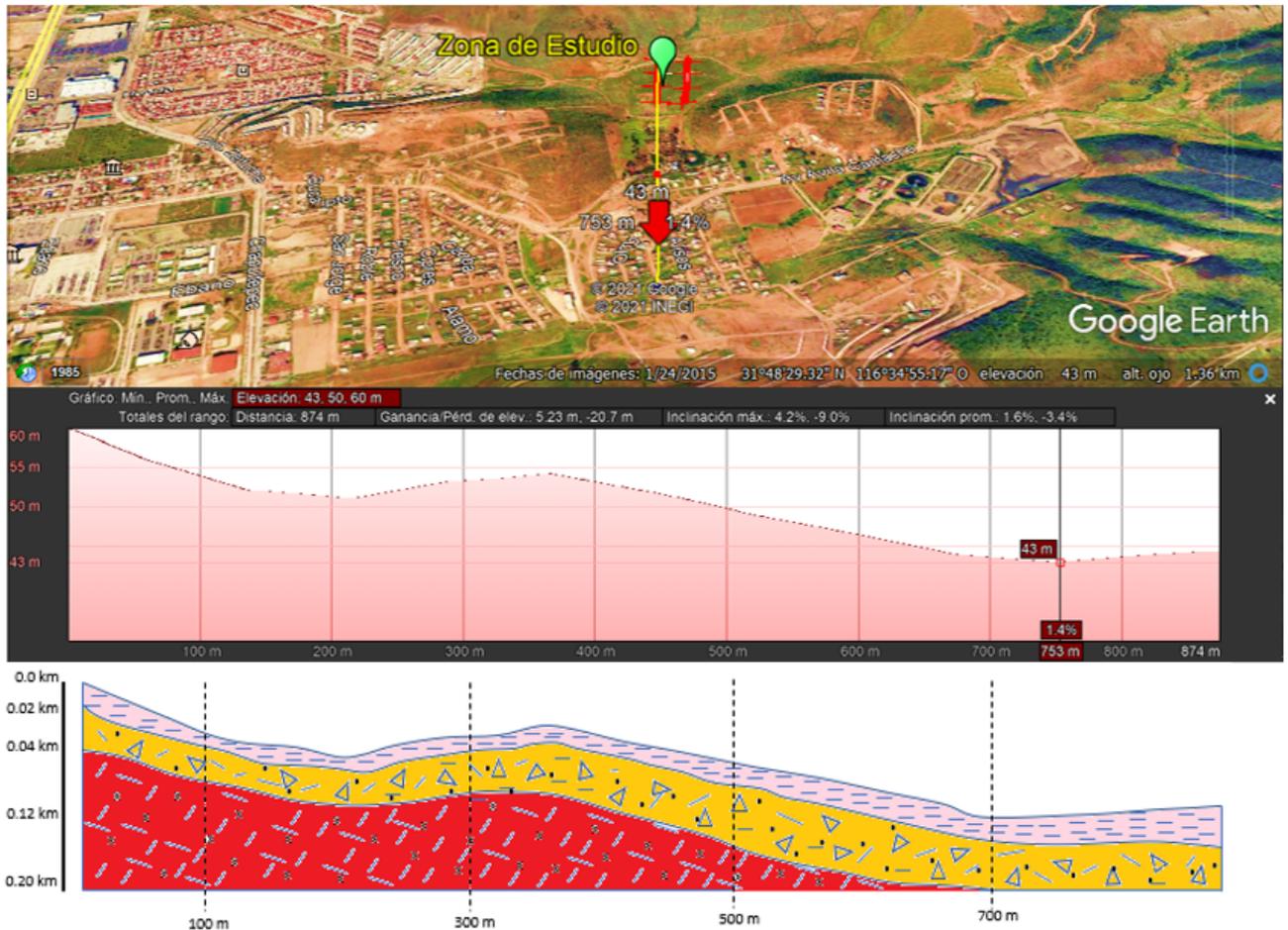


Figura 64. Modelo geológico propuesto.

Literatura citada

- Cagniard, L. (1953). Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, **18**: 605–635.
- CONAGUA (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero manadero (0212). *CONAGUA*, **2020**.
- Constable, S., C. Parker R., L., y Constable C, G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, **52**(3): 289–300.
- Egbert, G. D. y Kelbert, A. (2012). Computational recipes for electromagnetic inverse problems. *Geophysical Journal International*, **189**(1): 251–267.
- Flores Luna, C. (2000). La exactitud del problema directo de sondeos electromagnéticos transitorios. *GEOS*, **20**(2): 70–88.
- Flores Luna, C. F. y Peralta Ortega, S. A. (2009). Induced polarization with in-loop transient electromagnetic sounding: A case study of mineral discrimination at el arco porphyry copper, Mexico. *Journal of Applied Geophysics*, **68**: 423–436.
- García Fiscal, S. y Flores Luna, C. F. (2018). Sensitivity of galvanic and inductive induced polarization methods to the cole-cole parameters. *Journal of Applied Geophysics*, **158**: 1–10.
- Gastil, R. G., Phillips, R., y Allison, E., . C. . (1975). Reconnaissance geology of the state of Baja California. *Geological Society of America*, **140**.
- Junge, A. (1996). Characterization and correction for cultural noise. *Surveys in Geophysics*, **17**: 361–391.
- Kelbert, A., N., M., Egbert, G. D., y Tandon, K. (2014). Modem: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. *Computers Geosciences*, **66**: 40–53.
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, **2**(2): 164–168.
- Lezaeta, P. (2001). Distortion analysis and 3-d modeling of magnetotelluric data in the Southern Central Andes. *Tesis de doctorado*.
- Linde N., Kowalsky M., y H. S. (2006). Hydrogeophysical parameter estimation approaches for field scale characterization. applied hidrogeophysics. *Earth and Environmental Sciences*, **71**: 9–41.
- Lujan, V. (2006). Utilización de ondas electromagnéticas para detectar la invasión de agua marina en el acuífero de valle de manadero en Ensenada B.C. *Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada*.
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, **11**(2): 431–441.
- McNeill, J. (1990). Use of electromagnetic methods for groundwater studies: in geotechnical and environmental geophysics. *S.H.Ward, SEG*, **1**(5): 191–218.

- McNeill, J. (1994). Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding: Geonics technical. *note TN-27, Mississauga*, pp. 1–15.
- Menke, W. (2012). Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. *Academic press*.
- Mexicano, S. G. (2003). Carta geológico-minera Ensenada h11-2 Baja California. *Servicio Geológico Mexicano*, **1**: 1.
- Oliver Ocaño, F. M., G. D. L. A. R. J. J. M. y Pérez Flores, M. A. (2019). Structure of the Cerro Prieto pull-apart basin from joint inversion of gravity, magnetic and magnetotelluric data. *Journal of Applied Geophysics*, **170**: 1–16.
- Rodi, W. y Mackie, R. L. (2001). Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-d magnetotelluric inversion. *Geophysics*, **66**(1): 174–187.
- Ruiz, D. (2018). Applied electromagnetic methods for geothermal exploration in northern Mexico: 3d forward and inverse modeling of magnetotelluric data. *Tesis de doctorado, University of Cologne*.
- Ruiz-Aguilar, D., Tezkan, B., Arango-Galván, C., y J.M., R.-J. (2020). 3d inversion of mt data from northern México for geothermal exploration using tem data as constraints. *Journal of Applied Geophysics*, **172**.
- Santillán y Barrera, T. (1930). Las posibilidades petrolíferas en la costa occidental de Baja California entre los paralelos 30 y 32 de latitud norte: México. *Instituto de Geología*, **5**: 1–37.
- Simpson, F. y Bahr, K. (2005). Practical magnetotellurics. *Cambridge University Press*.
- Smith y West (1988). Inductive interaction between polarizable conductors: An explanation of a negative coincident-loop transient electromagnetic response. *Geophys*, **53**: 677–690.
- Tarantola, A. (2005). Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. *Siam*, **89**.
- Vozzof, K. (1972). The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *Geophysics*, **37**(1): 98–141.
- Vozzof, K. (1991). The magnetotelluric method. in: M.n. nabighian (editor), electromagnetic methods in applied geophysics: Application. *Society of Exploration Geophysicists*, **2**: 641–707.
- Vázquez R., Traslosheros C., V. M. y R., E. (1991). Evaluación geohidrológica en el noroeste de Baja California. Ensenada, México. *CICESE*, (18).

Anexo

Procesamiento de datos AMT 3D

A continuación se muestran los ajustes para cada una de las curvas de resistividad aparente y fase como un caso en el cual se ha fijado el valor de resistividad aparente y el espesor para la primer capa, a partir de los valores obtenidos de la inversión 1D de los datos TEM.

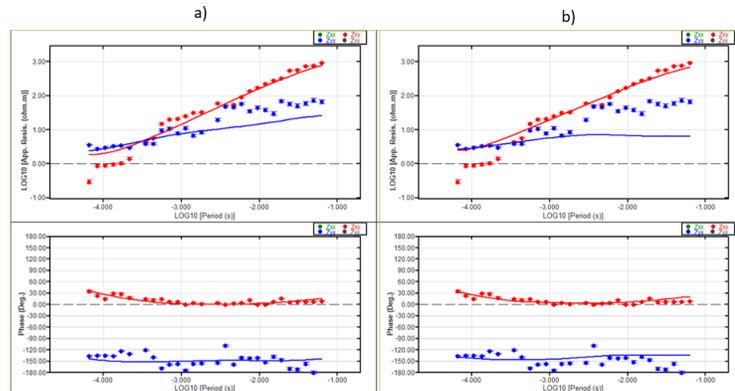


Figura 65. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 1. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primer capa.

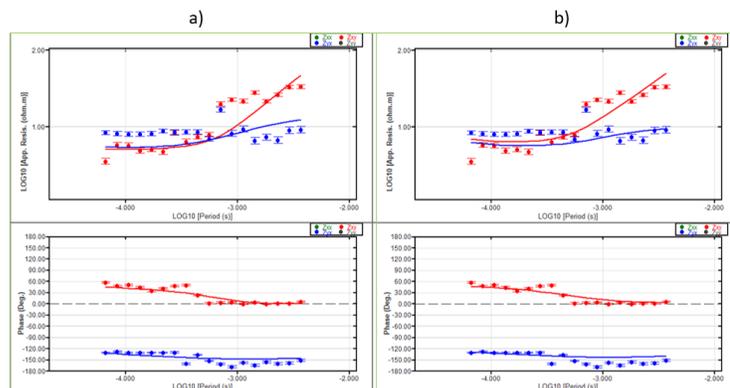


Figura 66. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 2. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primer capa.

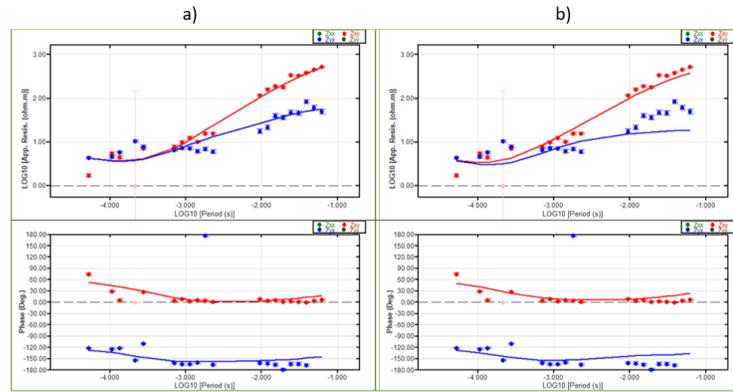


Figura 67. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 3. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa.

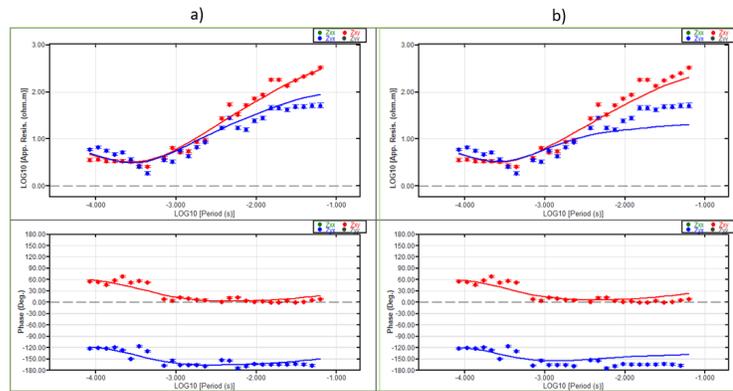


Figura 68. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 4. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa.

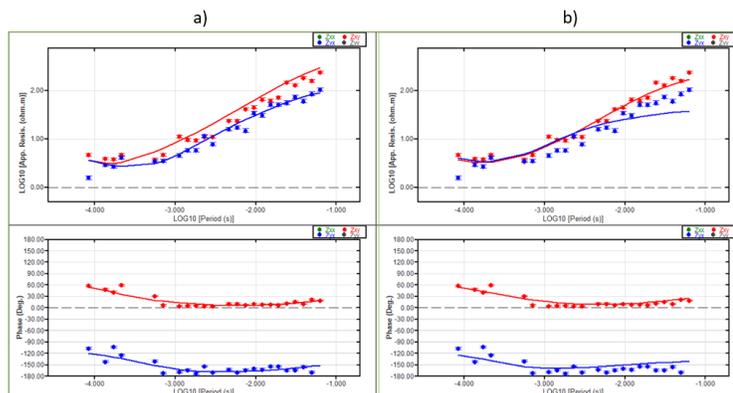


Figura 69. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 5. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa.

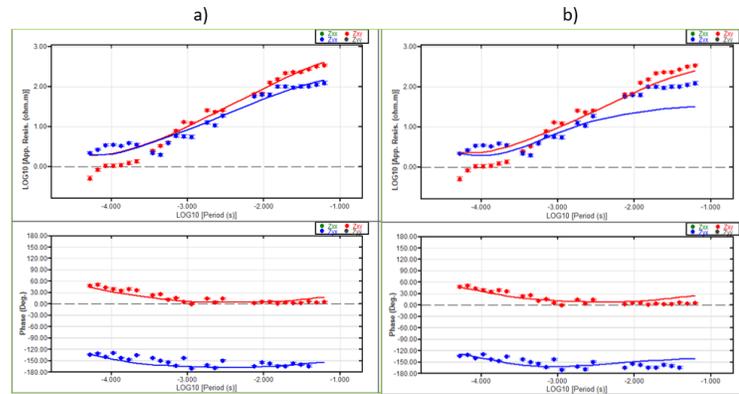


Figura 70. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 6. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa.

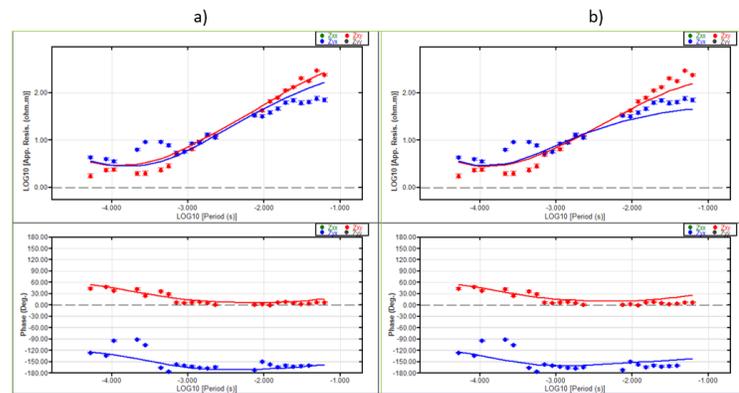


Figura 71. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 7. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa.

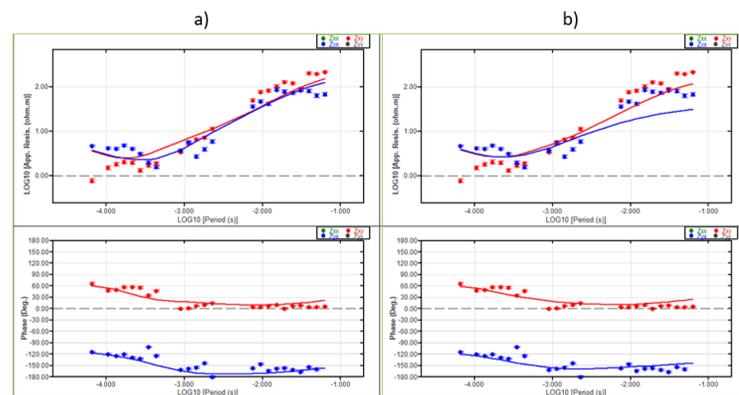


Figura 72. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 8. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de la primera capa.

A continuación se muestran los ajustes para cada una de las curvas de resistividad

aparente y fase como un caso en el cual se han fijado dos capas, es decir, para la inversión se ha dejado fijo el valor de resistividad y el espesor para la primera y segunda capa, a partir de los valores obtenidos de la inversión 1D de los datos TEM.

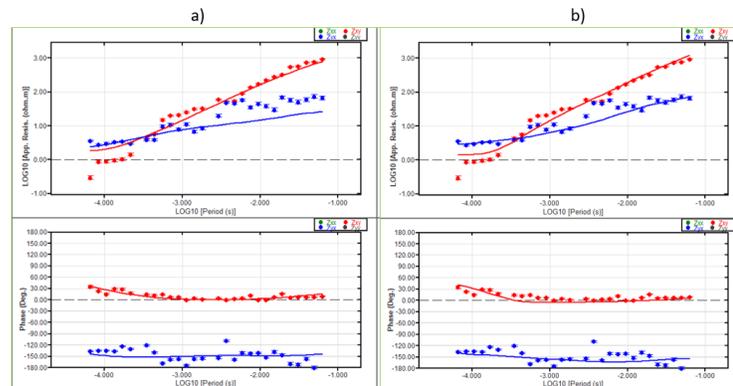


Figura 73. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 1. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras.

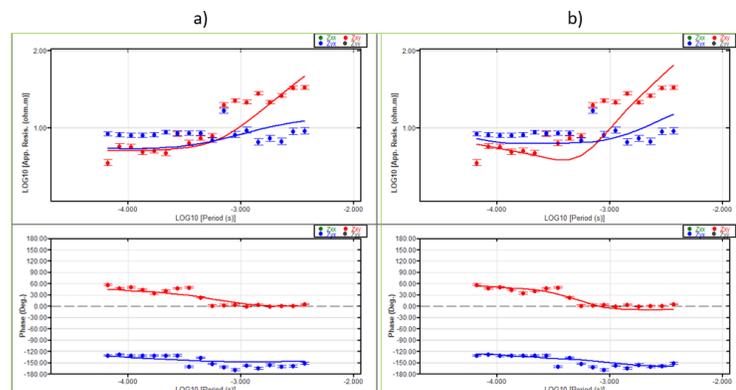


Figura 74. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 2. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras.

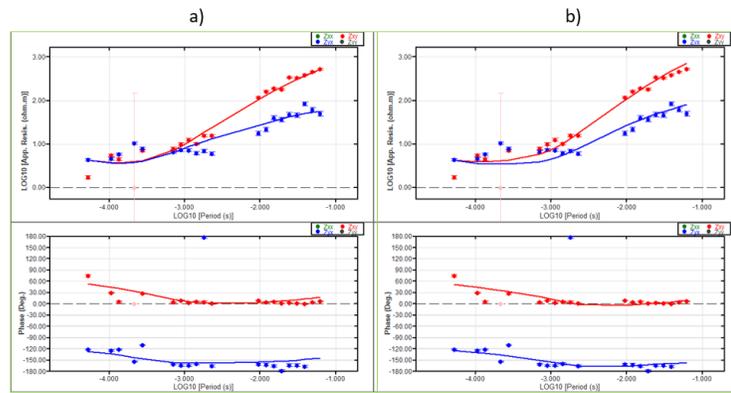


Figura 75. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 3. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras.

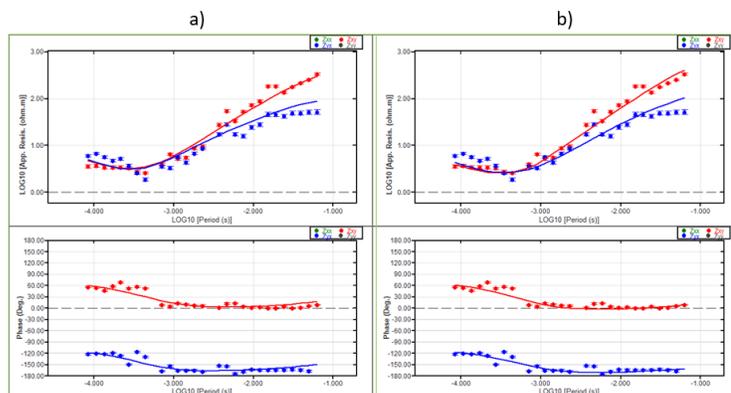


Figura 76. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 4. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras.

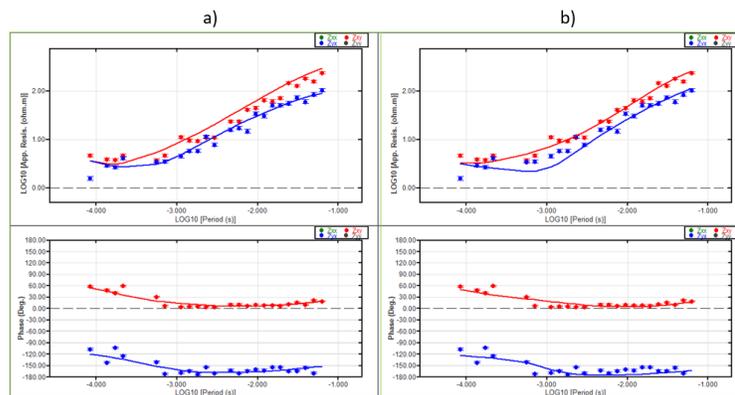


Figura 77. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 5. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras.

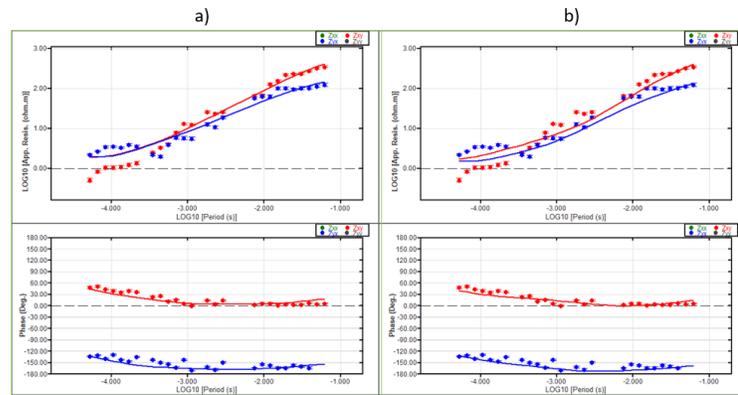


Figura 78. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 6. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras.

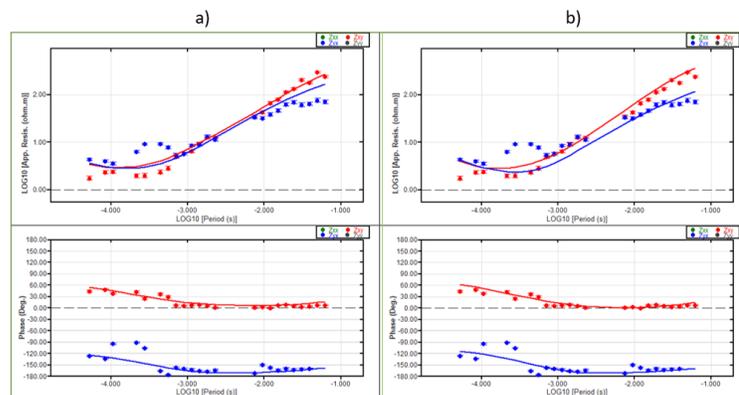


Figura 79. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 7. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras.

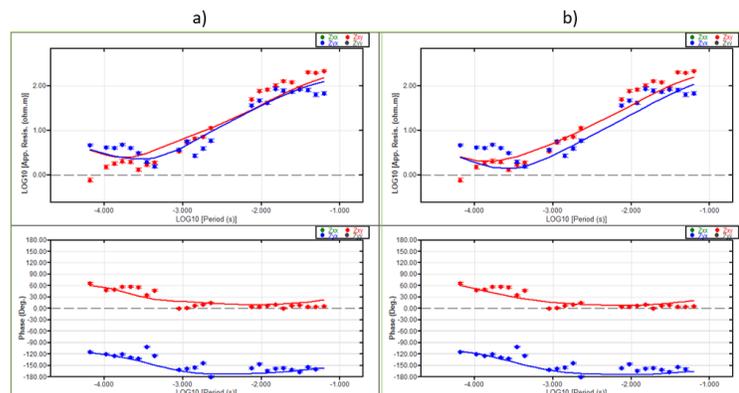


Figura 80. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 8. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos capas más someras.

A continuación se muestran los ajustes para cada una de las curvas de resistividad

aparente y fase como un caso en el cual se han fijado tres capas, es decir, para la inversión se ha dejado fijo el valor de resistividad aparente y espesor para la primera y segunda, así como la resistividad de la tercer capa, esto a partir de los valores obtenidos de la inversión 1D de los datos TEM. Adicionalmente, se eliminaron algunos datos inconsistentes (outliers) de las curvas de resistividad aparente y fase.

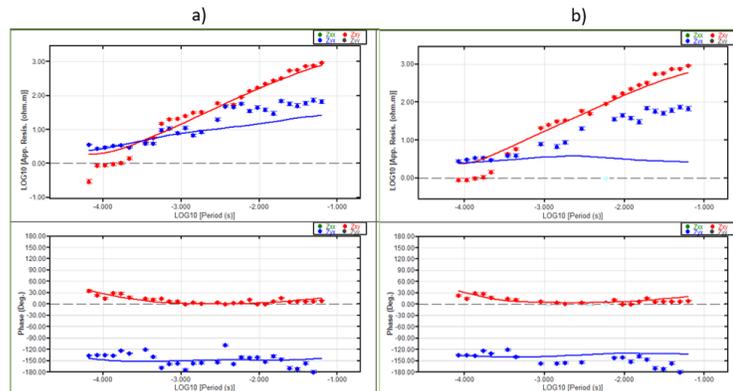


Figura 81. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 1. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas.

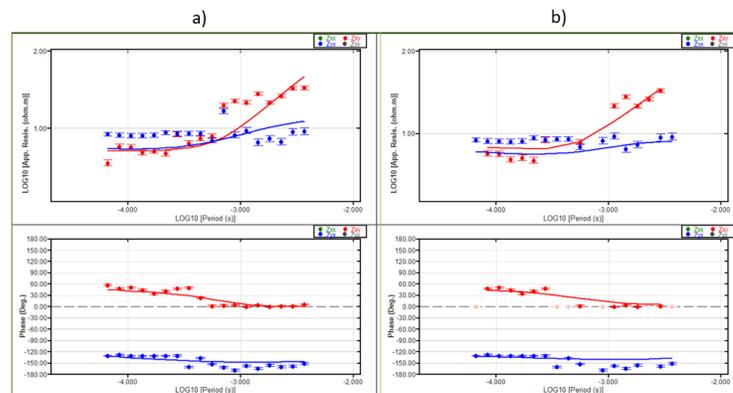


Figura 82. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 2. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas.

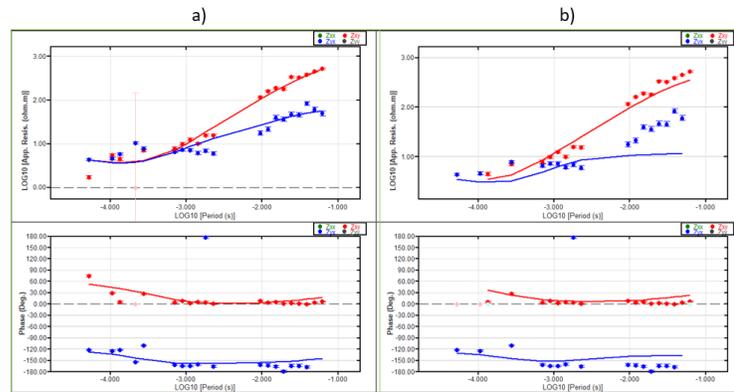


Figura 83. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 3. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas.

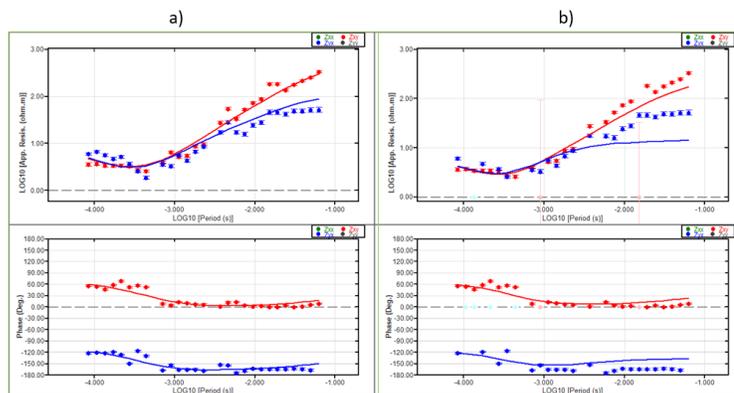


Figura 84. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 4. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas.

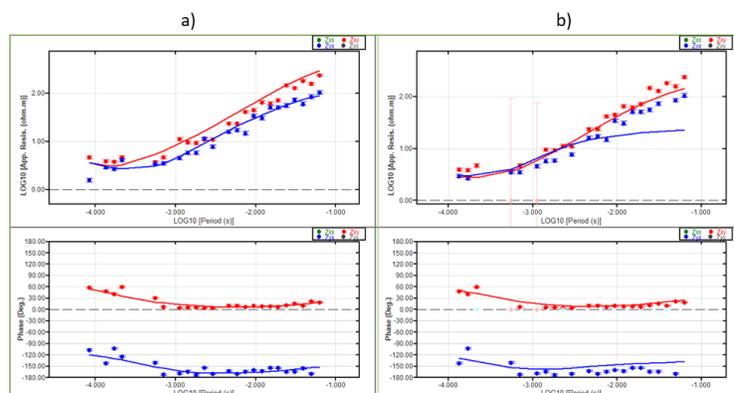


Figura 85. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 5. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas.

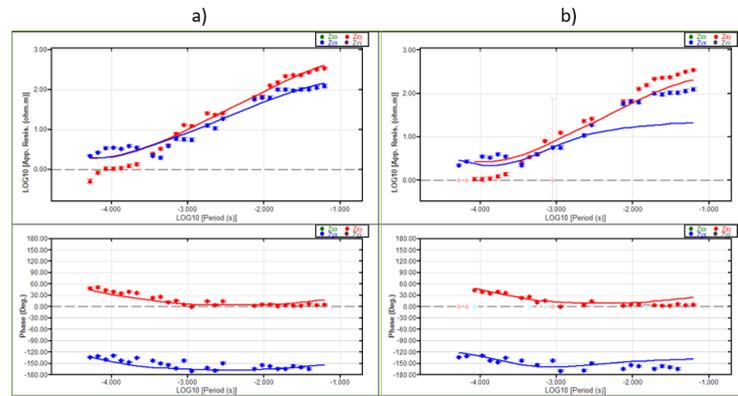


Figura 86. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 6. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas.

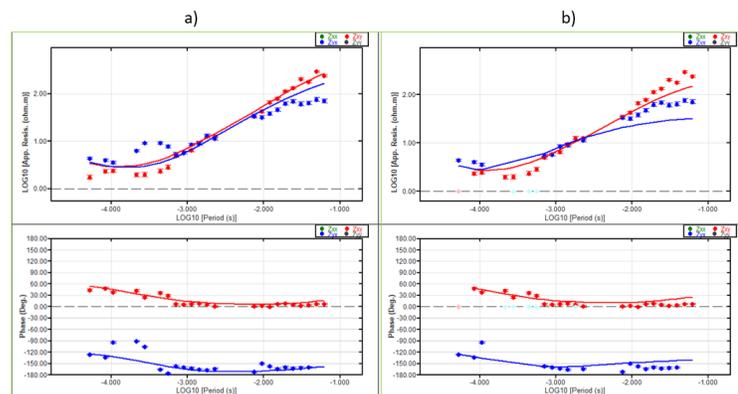


Figura 87. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 7. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas.

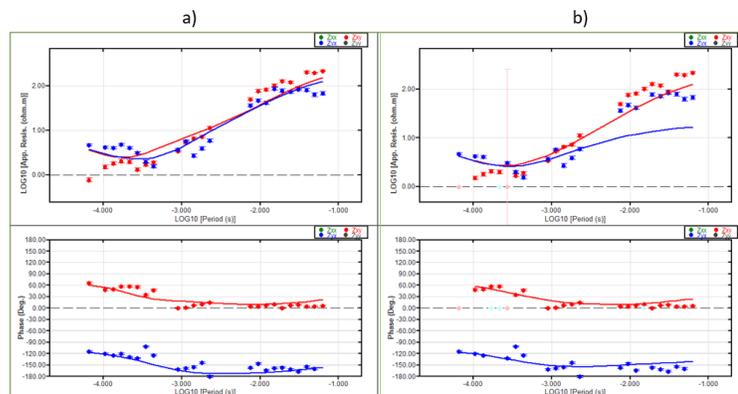


Figura 88. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 8. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa. Además se eliminaron algunos outliers en las curvas observadas.

A continuación se muestran los ajustes para cada una de las curvas de resistividad aparente y fase como un caso en el cual se han fijado tres capas, es decir, para la inversión se ha dejado fijo el valor de resistividad aparente y espesor para la primera y segunda, así como la resistividad de la tercer capa, a partir de los valores obtenidos de la inversión 1D de los datos TEM.

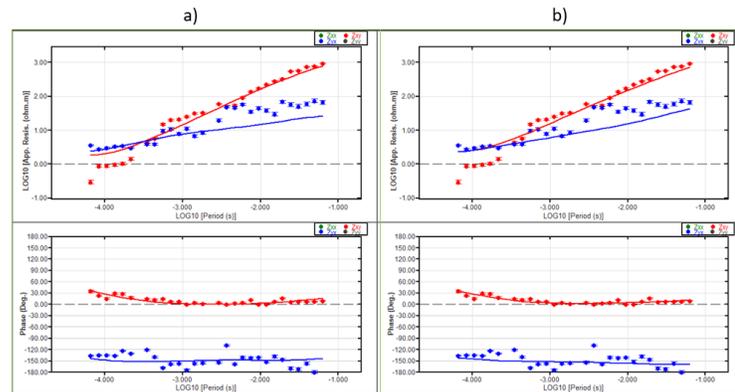


Figura 89. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 1. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa.

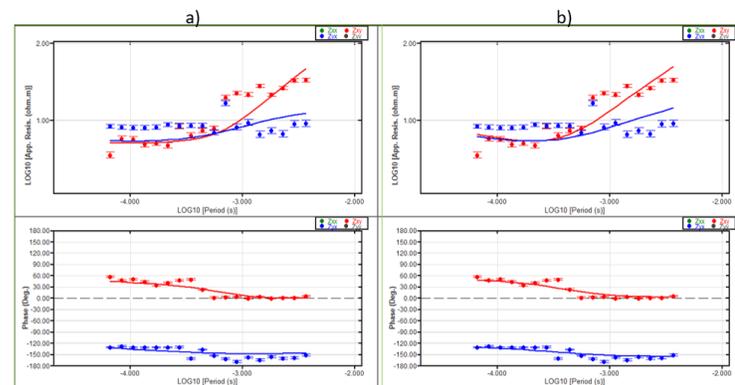


Figura 90. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 2. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa.

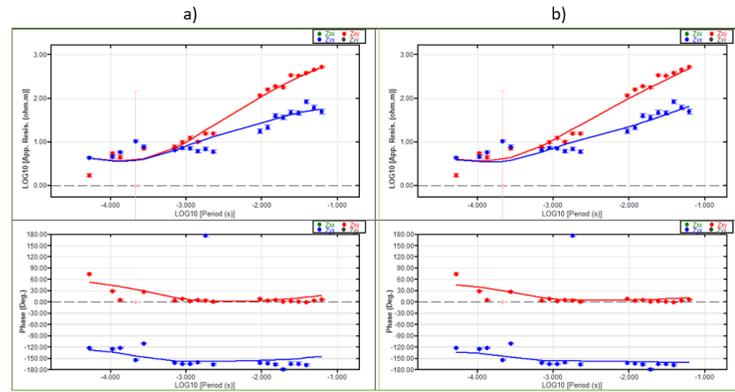


Figura 91. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 3. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa.

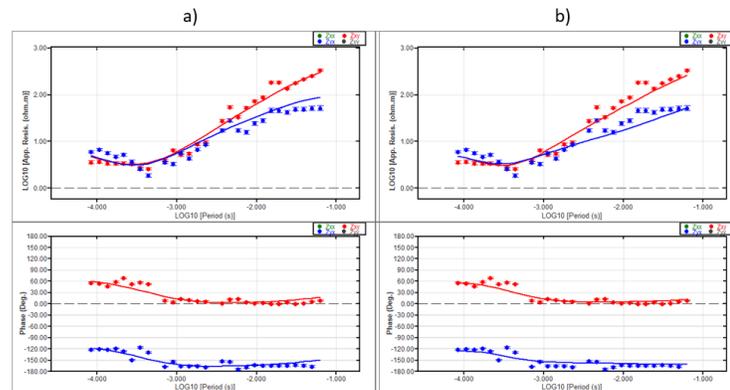


Figura 92. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 4. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa.

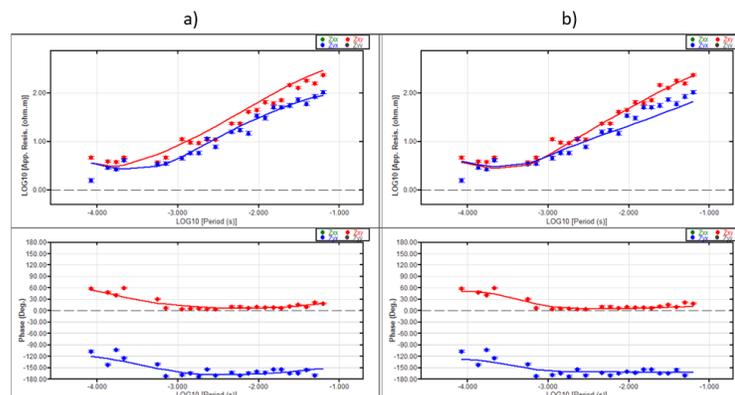


Figura 93. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 5. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa.

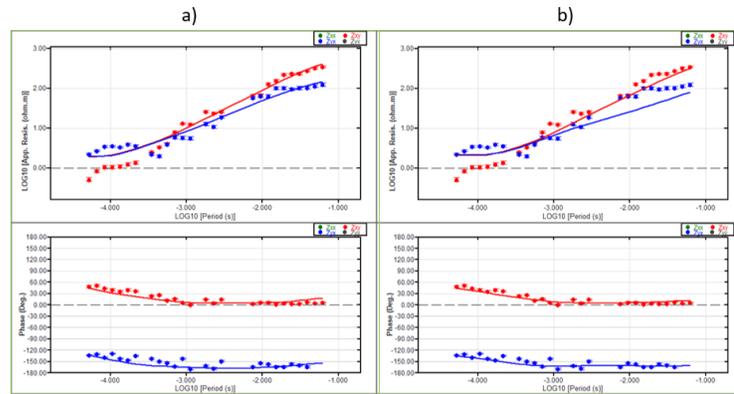


Figura 94. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 6. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa.

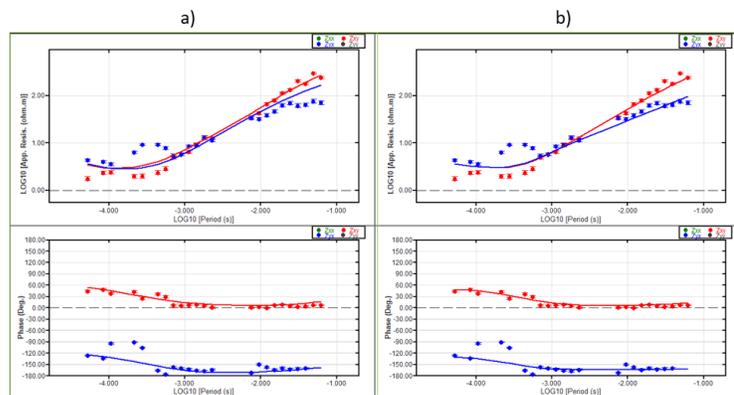


Figura 95. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 7. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa.

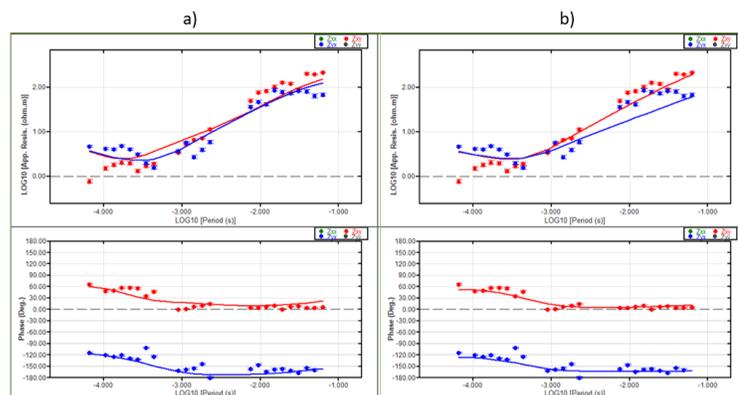


Figura 96. Ajuste realizado para la curva de resistividad y fase del sondeo 8. a) muestra el ajuste para el modelo apriori de 50 ohm-m, b) muestra el ajuste realizado al modelo fijando la resistividad y el espesor de las dos primeras capas y la resistividad de la tercera capa.

Inversión de datos AMT 3D

A continuación se muestran las curvas de resistividad aparente y fase observadas y calculadas con el modelo final el cual fue un modelo homogéneo de 50 ohm-m.

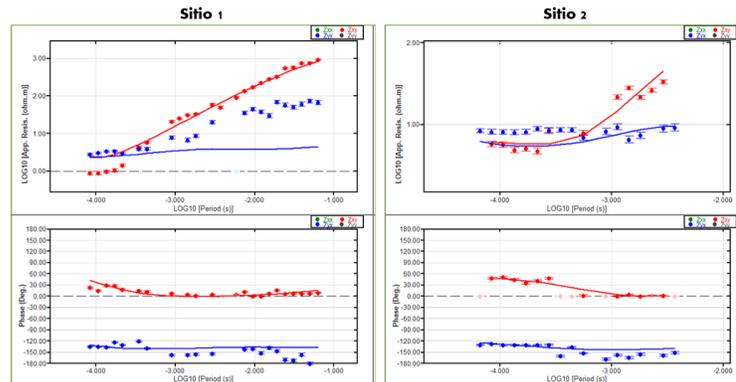


Figura 97. Ajuste final para el sitio 1 y 2.

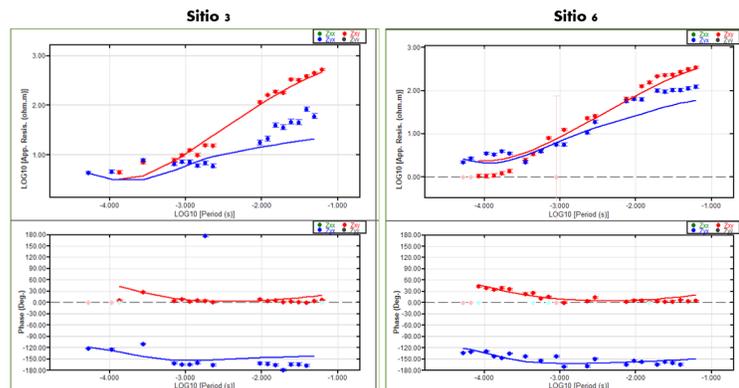


Figura 98. Ajuste final para el sitio 3 y 6.

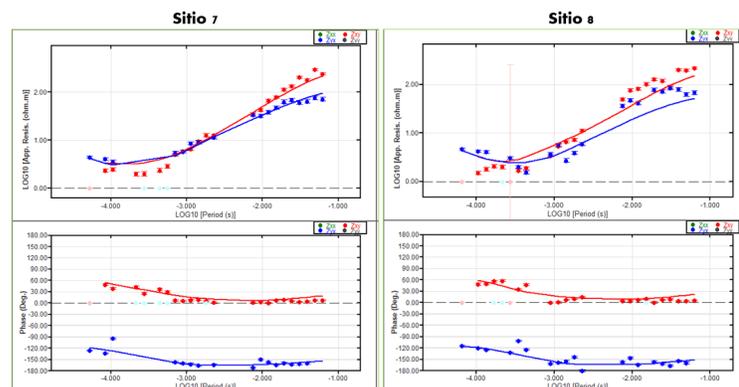


Figura 99. Ajuste final para el sitio 7 y 8.