



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización de Presa de
Jales Mineros en el estado de
Chihuahua, México**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

César Carrillo Martínez

DIRECTOR DE TESIS

M.I. José Antonio Martínez González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado CARACTERIZACION DE PRESA DE JALES MINEROS EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, MEXICO que presenté para obtener el título de INGENIERO GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo. ▸

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

CESAR CARRILLO MARTINEZ
Número de cuenta: 316218485

*La capacidad de vivir a fondo el instante sin
la maniática angustia de quemarlo pronto,
de atraparlo y utilizarlo con vistas a un
futuro que llegue cuanto antes y por tanto
de destruirlo en la espera de que la vida
toda la vida, pase velozmente*

Claudio Magris

Agradecimientos

A todos mis profesores, porque sin ellos nada de esto se habría logrado.

A mis padres que siempre han sido pilares en mi vida, siendo ejemplo de que con ser buena persona, lo demás estará bien. Rogelio siendo un sobre pensador nato, pero también un solucionador de cualquier situación desde el momento en que se le presenta. Gaby siendo una persona muy racional y reservada que siempre está dispuesta a hacer las preguntas necesarias para que tú te cuestiones y dar una opinión.

A mi hermano Javier que sin todo su apoyo en todos los aspectos de mi vida, desde impulsarme a seguir una carrera en ciencias y sobre todo, emocional en los momentos difíciles.

A mis abuelitas por siempre amarme de manera incondicional desde que soy un niño porque sin ese amor no hubiera logrado saberlo demostrar a los demás.

A mi abuelito Rubén, ejemplo de superación personal y guía en los momentos duros de la vida, incluso antes de su muerte me deja la enseñanza que si no te ríes y lo tomas con calma, no vale la pena seguir ese camino.

A mi asesor José Antonio, que siempre me alentó a dar un poco más, siempre escuchando y cuando hay que corregir y corregir errores hay que tener mano dura.

A mi tía Meche, que me enseñó el valor de trabajar por tus metas, encontrando placer en cosas más allá de lo profesional.

A mi tía Juanita, que siempre está dispuesta a escucharme y preguntar por cómo me siento al respecto, porque sin esas charlas no me hubiera dado cuenta de lo mucho que importan los sentimientos. A su esposo Salomón por ser un refugio en todo momento, a su hijo Mateo, que con su alegría y cariño genuino me hace conectar con mi infancia.

A mi padrino Lalo que sin recibir nada a cambio siempre me ha dado un ejemplo de poder tomar otros caminos, siendo gran confidente, maestro de música y de lo que significa ser buena persona. A su esposa Jannis que desde que apareció en su vida han resultado un espacio seguro para mí. A su hijo Nicolás que para mí representa el amor más puro.

Al resto de mi familia, que cada uno de ellos sabe lo mucho que representan en mi vida, sin todo este contexto no entendería que la vida se trata de apoyar a las personas en las buenas y sobre todo en las malas.

A mi mejor amiga, Nagibe. Mujer maravillosa y brillante de la cual he aprendido una infinidad de cosas, con quien he pasado momentos de felicidad los cuales voy a atesorar toda mi vida y que es un abrazo al corazón siempre, cuya existencia se convirtió en un pilar de mi vida recordándome que la amistad es lo más importante que existe en este mundo. Gracias

A Angélica Romero, Angie que me enseñó que la vida se va acomodando y siempre es bueno regresar a hablar de lo acontecido.

A Leonardo Viveros que me salvó una infinidad de veces tanto en las clases como en lo personal, porque sin ti, amigo no hubiera logrado terminar esta carrera.

A Alejandro F., Cristóbal C., Jorge V. Amigos de incontables batallas a los cuales les tengo que agradecer su amistad tan sincera, en ustedes encontré un refugio y un equipo de trabajo sobresaliente.

A Yusuri M., Angélica P., Arturo C., gracias por lo que compartimos, les deseo lo mejor siempre y cuenten conmigo.

A Bryan, mi real con quien he compartido muchas pláticas sobre la vida y esas charlas me han hecho ser un hombre con más perspectiva. A Emiliano, Benito C. Jaime Gutiérrez, Miguel M., Juan Pablo G., Jorge M., Brenda Ch., Ninel Ch., Todos ellos siempre han estado y no tengo más que agradecerles.

A Koke, que me salvaba en los momentos de más incertidumbre con su buena plática y las retas interminables de FIFA, siempre jugando el mismo partido.

Al repre de ingeniería femenil, me recordaron lo valioso que es darle toda la atención a un proyecto y trabajar duro por ello para lograr buenos resultados, que si se falla en algo siempre puedes volver a intentar.

A la DICT que me dio un espacio de trabajo durante mucho tiempo con el cual aprendí a balancear mi vida entre trabajo y recreación.

Al SSN que me abrió las puertas y se convirtió en un refugio de todos los problemas que tenía, sin esos momentos de quietud no hubiera aprendido tanto de mi.

Al Dr. Gilberto Casillas, que desde el momento en que recibió mi correo fue un salvavidas, en todo momento mostrando que la mejor manera de empezar algo es hacerlo. Gracias por todo el apoyo incluso después de ser servi-socialista.

Al cuerpo de árbitros del torneo académico de la UNAM, por toda la enseñanza y amistad que hemos creado a lo largo de varios años de conocernos, me enseñaron manejo de situaciones y toma de decisiones.

Al personal de actividades deportivas de la FI, porque me permitieron tener un espacio para desarrollar una actividad que quería hacer hace años. Siempre con un ambiente relajado y tranquilo que en los momentos que llegaban a ser más difíciles me apoyaron sin más.

A todas las personas que no aparecen en la lista porque son parte de mi vida y con ello he tenido situaciones, aprendizajes, cariño, risas, llanto, frustración, diversión y eso es lo que más me ha enseñado. La vida es de matices.

A la música, las bellas artes y todos los seres vivos con los que he convivido porque me han dado entendimiento que el mundo solo es y no tenemos que controlarlo, solo apreciarlo y disfrutar, siempre siendo gentiles con el mundo que nos rodea.

Resumen

Este trabajo presenta la caracterización geofísica en una presa de jales ubicada en el estado de Chihuahua, empleando un enfoque integrado de métodos sísmicos y eléctricos para comprender su estructura interna y evaluar sus condiciones de estabilidad actuales. A través de la aplicación combinada de refracción sísmica, MASW y tomografía de resistividad eléctrica, se lograron modelar las variaciones físicas de los materiales que conforman tanto el cuerpo de la presa como sus bordes, permitiendo distinguir entre zonas con diferentes comportamientos.

Los resultados demuestran que la integración de varias técnicas geofísicas evita el problema de la no unicidad en el análisis geotécnico y la gestión del riesgo en depósitos mineros, mostrando cómo la integración de diferentes técnicas geofísicas puede ofrecer una visión más completa del comportamiento del subsuelo. A pesar de las limitaciones inherentes a la resolución de los métodos y a la complejidad del medio, el estudio confirma la estabilidad estructural de la presa y evidencia la relevancia de la caracterización en su evaluación sísmica.

Más allá de los resultados específicos, este trabajo refuerza la importancia de la geofísica aplicada como un enlace entre la ingeniería y las ciencias de la Tierra, contribuyendo al desarrollo de metodologías accesibles, reproducibles y con impacto directo en la seguridad ambiental y operativa de las presas de jales en México.

Este trabajo resalta la importancia del uso de software libre como una herramienta de utilidad hoy en día para la enseñanza de la geofísica aplicada. Su implementación impulsa el entendimiento profundo de los métodos y de los parámetros involucrados en el modelado. Comprender el funcionamiento interno de las técnicas, sus alcances y limitaciones, permite tomar decisiones más informadas en la selección de métodos y configuraciones, optimizando la calidad de la interpretación. Como complemento, se desarrolló y se incluye en los anexos un manual detallado para el procesado de datos geofísicos utilizando software libre y comercial, con el propósito de facilitar su aplicación y servir como guía práctica para futuras investigaciones. De esta manera, el uso crítico y fundamentado del software libre no solo amplía las posibilidades técnicas, sino que también fortalece la capacidad analítica del investigador frente a los desafíos reales que plantean los estudios de estabilidad y caracterización del subsuelo.

Abstract

This work presents a geophysical characterization of a tailings dam located in the state of Chihuahua, using an integrated approach that combines seismic and electrical methods to understand its internal structure and evaluate its current stability conditions. Through the combined application of seismic refraction, MASW, and electrical resistivity tomography, it was possible to model the physical variations of the materials that make up both the dam body and its margins, allowing the identification of zones with different mechanical behaviors.

The results demonstrate that the integration of multiple geophysical techniques reduces the problem of non-uniqueness in geotechnical analysis and risk management of mining deposits, providing a more comprehensive view of subsurface behavior. Despite the inherent limitations of resolution and the complexity of the medium, the study confirms the structural stability of the dam and highlights the relevance of geophysical characterization in its seismic evaluation.

Beyond the specific findings, this work reinforces the importance of applied geophysics as a link between engineering and Earth sciences, contributing to the development of accessible and reproducible methodologies with direct impact on environmental and operational safety in Mexican tailings dams.

Additionally, this study emphasizes the importance of using open-source software as a valuable tool for geophysical education and research. Its implementation promotes a deeper understanding of the methods and parameters involved in modeling. Understanding the internal functioning, scope, and limitations of each technique allows for more informed decisions in method selection and configuration, improving interpretation quality. As a complement, a detailed manual for the processing of geophysical data using both open-source and commercial software is included in the appendices, serving as a practical guide for future investigations. The critical and well-founded use of open-source tools not only broadens technical possibilities but also strengthens the researcher's analytical capacity to address real-world challenges in subsurface characterization and stability assessment.

Índice general

Agradecimientos	ii
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
2. Marco geológico	3
2.0.1. Contexto geológico	3
2.0.2. Sismicidad histórica y ambiente tectónico	4
2.1. Jales Mineros	8
2.1.1. Criterios para la elección y construcción de una presa de jales mineros	11
2.1.2. Tipos de presas de jales mineros	12
3. Métodos geofísicos. Conceptos teóricos	15
3.1. Refracción sísmica	15
3.1.1. Inversión de Refracción sísmica	16
3.1.2. Software comercial	17
3.2. MASW	18
3.2.1. Inversión de MASW	19
3.3. Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)	20
3.3.1. Inversión de Tomografía de refracción sísmica	22
4. Metodología	24
4.1. Exploración sísmica	24
4.2. MASW	28
4.3. Exploración Eléctrica	29
5. Análisis y discusión de resultados	32
5.0.1. Refracción sísmica	32
5.0.2. MASW	38
5.0.3. Eléctrica	41
5.1. Evaluación del Riesgo Sísmico de la Presa de Jales	49

5.1.1.	Análisis pseudoestático de estabilidad global	50
5.1.2.	Estimación de desplazamientos permanentes (método de Newmark)	51
5.1.3.	Evaluación del freeboard post-sismo	51
5.1.4.	Integración de resultados y dictamen	51
5.2.	Evaluación de la Estabilidad Pseudoestática de la Presa de Jales	52
6.	Conclusiones	55
7.	Anexos	60
7.1.	Pre-procesado	60
7.1.1.	Datos iniciales	60
7.1.2.	Conversión a .sgy	60
7.2.	Refracción Sísmica	61
7.2.1.	Refrapick	61
7.2.2.	Refrainv	66
7.3.	Dromocronas	73
7.4.	Resultados de Refracción sísmica	81
7.5.	MASW	82
7.6.	Ploteo	94
7.6.1.	Ploteo de secciones con software comercial	94
7.6.2.	Ploteo de secciones con scrypt de python	101
7.7.	Curvas de dispersión	105
7.8.	Resultados de Análisis de ondas superficiales (MASW)	108
7.9.	Prospección Eléctrica	109
7.9.1.	Prosys	110
7.9.2.	Resipy	112

Índice de figuras

2.1. Zona de estudio en el mapa de provincias geológicas de Ortega (1992).	3
2.2. Zona de estudio con sección geológica	4
2.3. Zona de convergencia de las placas de Rivera, del Pacífico, de Cocos, del Caribe y Norteamericana (Fuente: Servicio Sismológico Nacional, UNAM)	5
2.4. Mapa de regionalización sísmica de México obtenido con el programa PRODISIS de la CFE (2015).	6
2.5. Mapa de sismos ocurridos dentro del estado de Chihuahua	8
2.6. Borde de la presa de Jales	9
2.7. Cresta y borde de la presa de Jales	10
2.8. Esquema teórico de presa de Jales aguas arriba con enrocamiento	13
2.9. Esquema teórico de presa de Jales aguas abajo con enrocamiento	14
3.1. Esquema teórico del viaje de ondas sísmicas (modificado de Adepelumi & Olorunfemi, 2015) [72].	16
3.2. Esquema de los arreglos utilizados en Tomografía de Resistividad Eléctrica. a) Arreglo Dipolo-Dipolo, b) Arreglo Wenner-Schlumberger. Tomado de (Audebert, 2016) [39]	22
4.1. Adquisición de datos en campo para línea 108	25
4.2. Operación de consola en la adquisición de datos en campo para refracción sísmica	25
4.3. Croquis en planta de la campaña de exploración sísmica en la zona de estudio. Los puntos rojos indican el inicio de la línea. Los puntos verdes indican la localización del punto de atribución MASW. Escala 1:310 m	26
4.4. Flujos de trabajo para Refracción Sísmica y dispersión de ondas MASW	27
4.5. Fotografía representativa en la adquisición de datos de tomografía eléctrica	29
4.6. Croquis en planta de la campaña de exploración eléctrica en la zona de estudio. Los puntos azules indican el inicio de la línea. Escala 1:310 m	30
4.7. Metodología para TRE	31
5.1. Comparación de perfiles sísmicos de velocidad de onda P (m/s) en TSF-01 de las líneas 101, 104, 105 y 106 en terreno natural y firme. Software libre (izquierda), software comercial (derecha).	33
5.2. Comparación de perfiles sísmicos de velocidad onda P (m/s) en TSF-02 de las líneas 115 y 116, sobre terreno natural. Software libre (izquierda), software comercial (derecha)	34

5.3. Comparación de perfiles Sísmicos de velocidad onda P (m/s) en TSF-01 de las líneas 102 y 103, sobre terraza de presa de jales. Software libre (izquierda), software comercial (derecha)	35
5.4. Comparación de perfiles sísmicos de velocidad onda P (m/s) en TSF-01 de las líneas 107 y 108, dentro del vaso de los depósitos de jales. Software libre (izquierda), software comercial (derecha)	36
5.5. Comparación de perfiles sísmicos de velocidad onda P (m/s) en TSF-01 de las líneas 109 a 112, dentro del vaso de los depósitos de jales. Software libre (izquierda), software comercial (derecha)	37
5.6. Comparación de perfiles sísmicos de velocidad onda P (m/s) en TSF-01 de las líneas 113 y 114, dentro del vaso de los depósitos de jales. Software libre (izquierda), software comercial (derecha)	38
5.7. Perfiles de velocidad de ondas S para la sección 107	39
5.8. Perfiles de velocidad de ondas S para la sección 111	39
5.9. Perfiles de velocidad de ondas S para la sección 113	40
5.10. Perfiles de velocidad 2D. El perfil representado con una línea roja corresponde al modelo promedio.	41
5.11. Resistividad de rocas, suelos y minerales (Loke, 2010)[74]	42
5.12. Resistividad de rocas, suelos y minerales (Palaky, 1987)[75]	42
5.13. Resultado de Tomografía Eléctrica para la parte superior de la presa de jales	43
5.14. Resultado de Tomografía Eléctrica para la parte superior de la presa de jales	44
5.15. Resultado de Tomografía Eléctrica para la parte superior de la presa de jales	45
5.16. Resultado de Tomografía Eléctrica para la parte inferior de la presa de jales mineros	46
5.17. Resultado de Tomografía Eléctrica para la parte inferior de la presa de jales mineros	47
5.18. Comparativa L101 (sísmica) vs TRE L101.	48
5.19. Comparativa L105 (sísmica) vs TRE L104.	48
5.20. Función de transferencia estimada a partir del modelo sismoestratigrafico de la 5.8 para la presa de jales y el terreno	52
5.21. Calculo del periodo de retorno de 2475 años para la zona de estudio empleando el programa Prodisis v4.1.	53
7.1. Esquema teórico del viaje de ondas sísmicas	60
7.2. Muestra de uso correcto de Anaconda Prompt	62
7.3. Interfaz gráfica de refracpick	62
7.4. Cargar proyecto en Refrapick.	62
7.5. Cargar las trazas sísmicas	63
7.6. Instrucciones para leer trazas sísmicas.	63

7.7. Modificar visualización de trazas	64
7.8. Permitir el modo picar y guardar	64
7.9. Desplegar domocrónicas	65
7.10. Guardar domocrónicas	65
7.11. Refrainv	66
7.12.	66
7.13. Ícono de picados	67
7.14. Selección de archivos	67
7.15. Picados cargados	67
7.16. Ícono de inversión	68
7.17. Parámetros de la malla	68
7.18. Ejemplo de visualización de la malla	69
7.19. Ejemplo de visualización de la malla	69
7.20. Comienzo de inversión	69
7.21. Modelo obtenido	70
7.22. Resultados de la inversión	70
7.23. Pantalla principal después de la inversión	70
7.24. Selección de ícono de guardado	71
7.25. Ruta de guardado modelos	71
7.26. Visualización de los resultados de inversión	72
7.27. Ejemplo de resultados de la inversión	72
7.28. Dromocronas de sección 101	73
7.29. Dromocronas de sección 102	73
7.30. Dromocronas de sección 103	74
7.31. Dromocronas de sección 104	74
7.32. Dromocronas de la sección 107	76
7.33. Dromocronas de la sección 108	76
7.34. Dromocronas de la sección 109	76
7.35. Dromocronas de la sección 110	77
7.36. Dromocronas de la sección 111	77
7.37. Dromocronas de la sección 112	77
7.38. Dromocronas de la sección 113	78

7.39. Dromocronas de la sección 115	79
7.40. Dromocronas de la sección 116	80
7.41. Resultado de Refracción sísmica para la parte superior de la presa de jales con software libre	81
7.42. Resultado de Refracción sísmica para la parte inferior de la presa de jales con software libre	82
7.43. Ejecución programa ZOND2D	83
7.44. Secuencia modo picado	83
7.45. Secuencia Apertura de datos	83
7.46. Tabla de geometría	84
7.47. Secuencia Apertura de módulo MASW	84
7.48. Parámetros para curvas de dispersión	85
7.49. Visualización de registro para curva de dispersión	85
7.50. Selección de datos para curva de dispersión	86
7.51. Secuencia de curva de dispersión	87
7.52. Ícono de módulo de inversión	88
7.53. Pantalla principal de módulo de inversión	88
7.54. Ícono de modelo inicial	89
7.55. Secuencia de modelo inicial	90
7.56. Secuencia de inversión	91
7.57. Ejemplo de sección obtenida en ZOND	91
7.58. Menú para exportar archivo	92
7.59. Menú para exportar archivo	92
7.60. Secuencia de inversión	93
7.61. Archivo para guardar como .txt	93
7.62. Archivo para guardar como .txt	94
7.63. Visualización de los resultados de inversión	94
7.64. Visualización de los resultados de inversión	94
7.65. Lectura de datos	95
7.66. Ventana de Interpolación	96
7.67. Creación de interpolación	96
7.68. Mapa de contorno en la barra de herramientas	97
7.69. Selección de malla creada	97
7.70. Modificar visualización de mapa y escala	98

7.71. Rellenar y escala de color mapa	99
7.72. Cambio y selección de escala de color	99
7.73. Modificación de tamaño de mapa	100
7.74. Guardar mapa	101
7.75. Apertura de los resultados de la inversión	102
7.76. Archivo para graficar	102
7.77. Apertura de los resultados de la inversión	103
7.78. Secuencia de conversión .xlsx a .csv	104
7.79. Secuencia de ploteo	104
7.80. Curvas de dispersión sección 112	106
7.81. Resultado de ondas superficiales MASW para la parte inferior	108
7.82. Resultado de ondas superficiales MASW para la parte superior	109
7.83. Secuencia de inicio Prosys	110
7.84. Secuencia de apertura de datos .bin	111
7.85. Secuencia de conversión a .csv	112
7.86. Apertura Resipy y selección de formato para archivos	113
7.87. Secuencia de carga de archivos	113
7.88. Secuencia de inversión	114
7.89. Secuencia de inversión	115
7.90. Secuencia de cambio de escala de color	116
7.91. Secuencia de guardado	117

Índice de tablas

2.1. Sismos de mayor magnitud de acuerdo con Suter (1991)	7
2.2. Clasificación de jales mineros	10
4.1. Resumen de trabajos sísmicos de refracción realizados en TSF-01 y TSF-02.	26
4.2. Resumen de trabajos de tomografía eléctrica realizados en TSF-01.	29
5.1. Clasificación de perfiles del suelo de acuerdo a la norma ASTM D5777	32
5.2. Unidades identificadas para las secciones 107 a 109	35
5.3. Unidades identificadas para las secciones 110 a 114	36
5.4. NEHRP Tipos de suelo basados en la velocidad de ondas superficiales de los primeros 30 metros	38
5.5. Tablas de valores promedio de perfiles de velocidad en la superficie de la presa.	40
5.6. Clasificación de las unidades eléctricas y su relación con tipos de material para TSF01 (suelo natural.) <i>U1</i> corresponde a materiales de baja resistividad, asociados a arenas limosas con humedad moderada; <i>U2</i> agrupa depósitos aluviales de resistividad intermedia que reflejan mayor compactación y menor saturación; <i>U3</i> representa zonas con alta conductividad	49
5.7. Clasificación de las unidades eléctricas y su relación con tipos de material para TSF01 (sobre jales.) <i>U1</i> indica materiales arcillosos con alto contenido de humedad y baja resistividad, <i>U2</i> corresponde a arenas parcialmente compactas o con menor contenido de agua, que presentan valores intermedios de resistividad.	49
5.8. Modelo sismoestratigrafico propuesto para la presa de jales	52

1 Introducción

De acuerdo con el Anuario Estadístico de la Minería en México (2024) [1], el estado de Chihuahua ocupa el tercer lugar nacional en valor de producción minera, después de Sonora y Zacatecas. Sus principales productos son oro, plata, plomo, zinc y cobre, los cuales representan un porcentaje significativo del valor económico nacional. En 2023 se reportó una producción de 349.8 mil onzas de oro y 15.79 millones de onzas de plata, mientras que la producción metálica base alcanzó 116,739 toneladas de zinc, 14,987 toneladas de cobre y 56,767 toneladas de plomo. La actividad minera genera grandes volúmenes de material residual denominado jal (NOM-141-SEMARNAT-2004)[2]., constituido por finos minerales y agentes químicos remanentes del proceso de beneficio. Este material se deposita en estructuras de contención conocidas como presas de jales, cuya función es permitir la decantación y secado de los sólidos antes de su disposición final. Sin embargo, el diseño y operación de estas estructuras requiere especial cuidado, pues su falla puede ocasionar deslizamientos, rompimientos o filtraciones con consecuencias ambientales severas.

Aunque la sismicidad principal de México se concentra en la región costera del Pacífico y el Eje Neovolcánico, el noroeste del país, particularmente entre Sonora y Chihuahua, presenta fallas corticales activas asociadas al sistema extensional de la cuenca de Bavispe y al límite norte del Eje Neovolcánico. Estas estructuras constituyen una fuente potencial de sismos locales moderados capaces de generar movimientos que afecten la estabilidad de presas de jales. De lo anterior, es de suma importancia reconocer que este tipo de estructuras mineras puede ser vulnerable ante la ocurrencia de excitaciones dinámicas.

Es por ello, que la seguridad y estabilidad de las presas de jales mineros constituyen un problema de gran relevancia para la gestión ambiental y el riesgo sísmico en regiones mineras de México. La ausencia de estudios integrales que combinen distintos métodos geofísicos dificulta la caracterización confiable de presas de jales. Este trabajo propone una metodología combinada basada en la integración de los métodos de refracción sísmica, análisis de ondas superficiales (MASW) y tomografía de resistividad eléctrica (TRE) para la evaluación estructural de una presa de jales en Chihuahua. La aplicación conjunta de estas técnicas permitirá identificar zonas de debilidad, saturación o fracturamiento, y así contribuir a la prevención de fallas con implicaciones ambientales y sociales.

El presente documento se estructura de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se describe el contexto geológico y sísmico de la región de estudio; en el Capítulo 3 se presentan los fundamentos teóricos de los métodos geofísicos empleados; el Capítulo 4 detalla la metodología de adquisición y procesamiento; en el Capítulo 5 se discuten los resultados obtenidos y su interpretación; finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

1.1 Objetivos

Objetivo general

Evaluar la estructura interna y las condiciones del subsuelo de una presa de jales en Chihuahua mediante la integración de métodos geofísicos sísmicos (refracción y MASW) y eléctricos (TRE), con el fin de generar un modelo geofísico confiable que sirva para el análisis de estabilidad geotécnica del sitio.

Objetivos específicos

1. Procesar y analizar los datos de refracción sísmica, MASW y tomografía de resistividad eléctrica mediante el uso de software libre y comparar resultados con software comercial.

2. Interpretar los resultados geofísicos en función de parámetros geotécnicos relevantes que definan la estabilidad estructural de la presa.
3. Identificar zonas con posibles condiciones de debilidad, saturación o fracturamiento dentro del cuerpo de la presa y su entorno inmediato.
4. Integrar los resultados en una metodología replicable de caracterización sísmico-eléctrica para la evaluación de presas de jales en otras regiones mineras.
5. Evaluación sísmica de la presa de jales y cálculo de riesgo sísmico

2 Marco geológico

El estado de Chihuahua se ubica en la parte norte de la República Mexicana, entre las coordenadas 31°47' a 25°35' N y 109°04'O a 103°18'O Este estado posee una superficie de 247,455 km², lo que representa el 12.37 % de la superficie total de la República Mexicana. Colinda al norte con los Estados Unidos de América, al este con Coahuila, al sur con Durango y al oeste con Sonora. A continuación, se menciona de manera general el contexto geológico y la sismicidad propia de la región.

2.0.1 Contexto geológico

La Sierra Madre Occidental (SMO) constituye una de las provincias volcánicas más extensas e importantes de México y representa el resultado de una prolongada evolución magmática y tectónica asociada a la subducción de la placa Farallón bajo la placa Norteamericana y a la apertura del Golfo de California. De acuerdo con Ferrari et al.(2007) [3], su desarrollo comprende una serie de episodios magmáticos que abarcan desde el Cretácico Superior hasta el Cenozoico, reflejados en la formación de secuencias ígneas plutónicas y volcánicas que incluyen el Complejo Volcánico Inferior del Eoceno y una extensa cobertura de ignimbritas del Oligoceno al Mioceno temprano, conocidas como el Supergrupo Volcánico Superior. Este conjunto de unidades, superpuestas sobre un basamento de edad Precámbrica a Mesozoica, constituye la base estructural sobre la cual se desarrollaron los procesos tectónicos extensionales posteriores. La SMO, por tanto, no solo representa una provincia de gran volumen volcánico, sino también un marco litosférico que registra la transición entre la subducción compresiva del Mesozoico y el régimen extensional del Cenozoico que domina actualmente el noroeste de México.

Ortega, 1982[4] describe el país en provincias geológicas, cada una de ellas presentan características específicas así como la enumeración de cada una de estas provincias, siendo la que corresponde a la zona de estudio presentada en este trabajo corresponde a la número 26 y se puede ver en la figura 2.1 donde (Ortega,1992) integró su trabajo en un mapa [5]. La provincia sobre la que descansa la zona de estudio es llamada provincia tectónica conocida como Cuencas y Sierras.

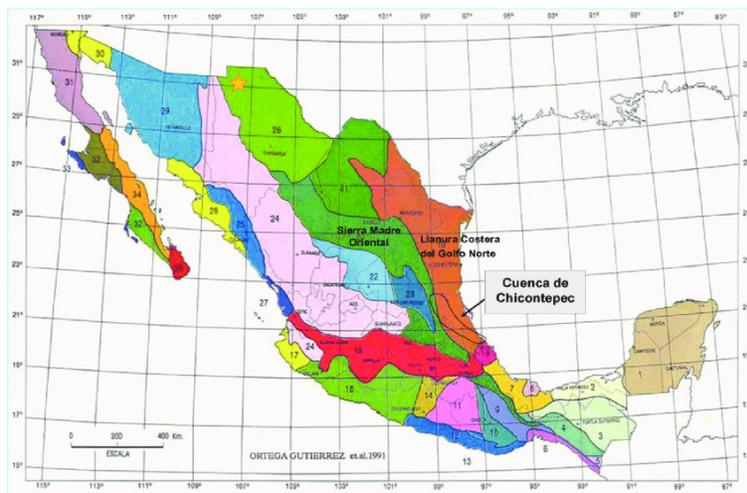


Figura 2.1: Zona de estudio en el mapa de provincias geológicas de Ortega (1992).

La provincia de Cuencas y Sierras, se caracteriza por un régimen de extensión activo desde el Oligoceno

hasta la actualidad (Osborn,2024) [6]. Esta distensión continua, vinculada al Rift del Río Grande, es la causa principal de la actividad sísmica histórica en la región. Geológicamente, la Sierra Madre Occidental aporta además un marco volcánico compuesto por ignimbritas y rocas volcánicas del Oligoceno (34–23 Ma) (Ferrari,2007), que descansan sobre depósitos sedimentarios del Mesozoico (250–66 Ma), particularmente del Cretácico Inferior (145–100 Ma). Este basamento, sometido a la extensión cortical del Mioceno (23–5 Ma), se fragmentó en bloques controlados por fallamiento normal, dando origen a las estructuras actuales. La combinación de este basamento rígido, el relleno aluvial y volcánico de los grabens, y la persistencia de actividad tectónica, explica tanto la sismicidad histórica como el potencial de futuros eventos.

Suter,M(2001) [70] menciona que la sismicidad registrada en zonas del noroeste como La Morita, Bavispe, Nacozari, Fronteras–Granados e incluso El Paso, constituye evidencia directa de la interacción entre los sistemas de fallas del Basin and Range y los procesos de extensión asociados al Rift del Río Grande. Aunque la recurrencia de grandes sismos no es alta en esta zona, ha habido eventos grandes como el de Bavispe (CENAPRED,2002)[71] que demuestran la importancia de considerar esta región como una zona de riesgo sísmico significativo para la infraestructura y las comunidades asentadas en ella. El sitio en estudio, ubicado hacia el este de la Sierra El Fresnal, está compuesto por vulcanitas del Paleógeno, principalmente basaltos y piroclastos del Eoceno–Oligoceno, representando un ambiente volcánico típico del borde oriental de la SMO.

La zona de estudio, por tanto, refleja una historia geológica particular donde convergen dos provincias contrastantes: la Sierra Madre Occidental, de origen volcánico y asociada a procesos magmáticos intensos durante el Oligoceno, y la provincia de Cuencas y Sierras, resultado de la extensión cortical iniciada durante el Mioceno. Este contacto estructural se manifiesta en una serie de bloques elevados y hundidos tipo Horst–Graben, característicos de la tectónica Basin and Range, los cuales configuran la topografía y controlan la disposición actual de los materiales aluviales y volcánicos en el área. En los límites de las presas de jales afloran depósitos sedimentarios del Cretácico Inferior (KaCz), principalmente del Aptiano–Albiense, los cuales representan una fase marina somera típica de esa época. En la Figura 2.2 se muestra un fragmento del Mapa Geológico publicado por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2005) [7], donde se ha colocado la zona de estudio respecto a las unidades geológicas presentes en la región.

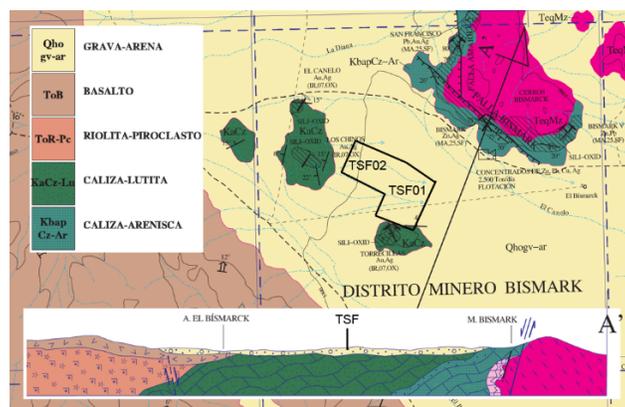


Figura 2.2: Zona de estudio con sección geológica

2.0.2 Sismicidad histórica y ambiente tectónico

Sismotectónica

La República Mexicana está dividida por cinco Placas Tectónicas: placa del Caribe, placa de Cocos, placa Norteamericana, placa del Pacífico y la placa de Rivera, que interactúan entre sí generando sismos en todo el

territorio nacional. Además, esta tectónica es responsable del vulcanismo en México como se puede en 2.3.

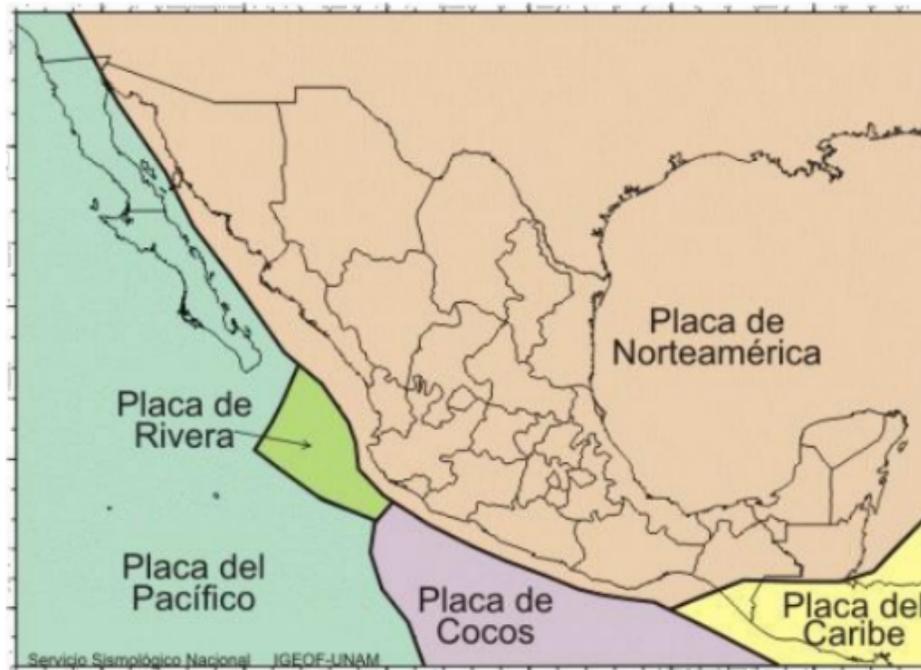


Figura 2.3: Zona de convergencia de las placas de Rivera, del Pacífico, de Cocos, del Caribe y Norteamericana (Fuente: Servicio Sismológico Nacional, UNAM)

Para visualizar los daños y efectos a nivel regional producidos por un sismo de magnitud importante, se elaboran mapas de intensidades sísmicas. En ellos se muestran zonas que permiten comparar las áreas y niveles de afectación, producto de un evento en particular. El mapa de intensidades para la República Mexicana se encuentra dividido en cuatro zonas sísmicas, esta regionalización se realizó con fines de diseño antisísmico (construcción) como se indica en la figura 2.4. Estas zonas son un reflejo de qué tan frecuentes son los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo a esperar (CFE, 2015) [8].

Zona A: No se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado terremotos en los últimos 80 años, y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10 % de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.
- Zonas B y C: Se consideran zonas intermedias, donde, no tan frecuentemente, se registran sismos; o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70 % de la aceleración de la gravedad.
- Zona D: Se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70 % de la aceleración de la gravedad.

Regionalización sísmica para el Estado de Chihuahua

En la Entidad se tienen dos de las cuatro zonas sísmicas (zona A y B) de la República Mexicana. La ocurrencia de sismos es mayor hacia la línea de costa y estos disminuyen conforme el terreno se adentra al continente, en términos de la actividad sísmica nacional registrada. El oriente del estado se considera una zona sísmica de baja actividad. La parte central del estado está catalogada como una zona de actividad sísmica moderada. Por otra parte, la ocurrencia de un evento sísmico de magnitud importante ya sea regional o distante, principalmente proveniente del estado de Sonora, pueden llegar a provocar afectaciones de menores a moderadas, con base en la escala de Mercalli para medir la intensidad (IMM). También existe en la zona



Figura 2.4: Mapa de regionalización sísmica de México obtenido con el programa PRODISIS de la CFE (2015).

sismos de pequeña magnitud generados por la actividad relacionada al fracking proveniente de los estados del Sur de Estados Unidos de Norteamérica.

Reseña de sismos históricos

El estado de Chihuahua se encuentra ubicado entre dos provincias geológicas, la Sierra Madre Occidental al oeste y la Provincia de Cuencas y Sierras en su parte este. La Provincia de Cuencas y Sierras recibe ese nombre por la presencia de grandes sierras separadas de otras por extensos bolsones. La región más al norte de Chihuahua está también influenciada por el rift del Río Bravo. Es cerca del límite entre la Sierra Madre Occidental y la Provincia de Cuencas y Sierras en donde se generan sismos de magnitud baja y moderada. En el registro histórico de Chihuahua uno de los sismos de mayor magnitud tuvo lugar en 1928 con el sismo de Parral de magnitud 6.3 a 6.4. Este evento sacudió intensamente el sur del estado, generando daños materiales significativos en localidades como Parral, Meoqui y Camargo, y fue sentido incluso en Ciudad Juárez, El Paso y Guadalupe [9].

El evento más notable ha sido el sismo de 1887 en Bavispe, con epicentro en el norte de Sonora, cuya magnitud estimada fue de 7.4 de acuerdo con Suter (1991). Otros sismos de magnitudes intermedias han sido el ocurrido en 1907 en Colonia Morelos, Sonora (5.2), el de 1913 en Huasabas, Sonora (5.0) y el de 1965 en Nicolás Bravo, Chihuahua (5.0). En septiembre de 2013 se registró un sismo con magnitud 5.4 cercano a la Cd. de Santa Gertrudis. El tiempo de ocurrencia entre eventos grandes localizado en la zona norte es evidente; sin embargo, de los datos históricos podemos observar que, si pueden llegar a ocurrir eventos de gran magnitud, que los hacen potencialmente destructivos. En 2013, un enjambre sísmico de magnitud máxima 5.4 Mw sacudió la región entre agosto de 2013 y enero de 2014, activando fallas como la del Vallecito y Peñasco, asociadas al Graben Central de Chihuahua [10].

Tectónica

Las fallas de la Provincia de Cuencas y Sierras son fallas normales antiguas, establecidas hace millones de años poco después de los eventos volcánicos que dieron origen a la Sierra Madre Occidental en el periodo geológico del Oligoceno del tiempo geológico, hace 30 millones de años. Las fallas pueden tener largos periodos sin actividad, para luego reactivarse. La región de Bavispe y sus alrededores son de interés ya que se considera como una de las zonas de mayor interés sísmico del noroeste de México debido a la magnitud del evento de 1887 y a la presencia de un sistema de fallas activas que se prolongan a lo largo del oriente de Sonora y el noroeste de Chihuahua. Suter en 1991 [11], estudió e identificó fallas activas, escarpes y deformación vinculados al sismo de Bavispe (1887) [12] . Asoció la ocurrencia de este sismo con la ruptura de más de 100 km de la falla de Pitaycachi, lo que evidencia la capacidad de estas estructuras para generar eventos de gran magnitud y confirma su carácter activo dentro del régimen técnico actual. Posteriormente, en 2001 [13] publica un catálogo detallado sobre los sismos en Sonora y el noroeste de Chihuahua desde el año 1887 hasta 1997, siendo los de mayor magnitud:

Sismo	Lugar	Fecha	Magnitud M_w
Bavispe	Sonora	03/05/1887	7.4±0.3
Colonia Morelos	Sonora	1907	5.2±0.4
Huasabas	Sonora	17/05/2013	5.0±0.4
Granados-Huasabas	Sonora	18/12/2023	5.7±0.4
Nicolas Bravo	Chihuahua	28/10/1965	5.0 M_b

Tabla 2.1: Sismos de mayor magnitud de acuerdo con Suter (1991)

En la figura 2.5 se muestran los sismos con magnitud mayor a 4.0 registrados y asentados en el catálogo que presenta el Servicio Sismológico Nacional (1900) (SSN,2025) [14] dentro del estado de Chihuahua. Es importante señalar que los registros sísmicos anteriores a la segunda mitad del siglo XX presentan limitaciones significativas, debido a la escasa instrumentación disponible en las primeras décadas del siglo pasado, de los cuales solo se tienen 3 eventos en el mismo catálogo mencionado con anterioridad. Por ello, la menor cantidad de eventos reportados antes de la modernización de la red no necesariamente refleja una baja actividad sísmica, sino las diferencias en capacidad de detección. Por otra parte, se observa que en las inmediaciones de la zona de estudio no se tiene registro de eventos de gran magnitud recientes.

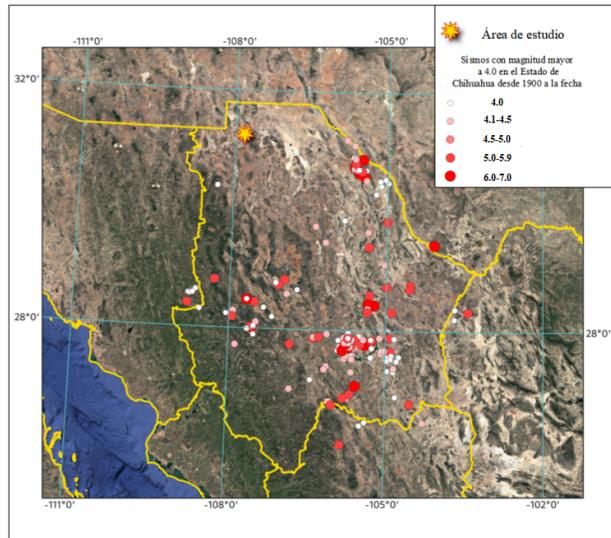


Figura 2.5: Mapa de sismos ocurridos dentro del estado de Chihuahua

La mayoría de los sismos reportados en este catálogo se localizan en el área del epicentro del evento de 1887, vinculados a la falla de Pitaycachi y al sistema de fallas asociadas que controlan la morfología de la Sierra Madre Occidental en este sector. Sin embargo, también se han registrado sismos en otras localidades, particularmente en el valle del graben, donde la tectónica extensional ha favorecido el desarrollo de depresiones alargadas delimitadas por fallas normales. Un graben, de acuerdo con (Twiss, 2007) [15], corresponde a un bloque hundido respecto a bloques adyacentes elevados (horsts), lo que refleja un esfuerzo regional de estiramiento cortical. Esta estructura geológica es característica de la provincia geológica conocida como Basin and Range, la cual se extiende desde el oeste de Estados Unidos hacia el norte de México y se encuentra íntimamente relacionada con la dinámica de extensión posterior a la subducción de la placa Farallon. En términos de Protección Civil, esto significa que cualquiera de las decenas de fallas de la Provincia de Cuencas y Sierras puede reactivarse y generar sismos de moderada o baja magnitud, pero que eventualmente la ruptura de esas fallas puede generar sismos de gran magnitud que podrían considerarse como destructivos. Por eso es importante monitorear la sismicidad del país, a través de la instalación de sensores sísmicos que cubran una gran parte del territorio. De lo anterior, se identifica que la ocurrencia de temblores en el estado de Chihuahua no es rara.

2.1 Jales Mineros

Los jales son los residuos asociados a la explotación minera. Las presas de jales mineros son estructuras diseñadas para almacenar los residuos generados durante el proceso de extracción y explotación de minerales. En el año 2004 la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) aprueba la NOM-141 en la cual se establece una manera adecuada para disponer de las presas de jales mineros[2]. En esta norma se establece que las presas pueden ser de tierra, roca o una combinación. Su diseño depende de factores como la cantidad de jales a almacenar y la geología del área. En cuanto al diseño, deben incluir sistemas de drenaje para gestionar el agua, reduciendo la presión interna y evitando el colapso.

Es importante mencionar ciertos conceptos para entender la estructura de una presa de jales, las definiciones que se presentan están de acuerdo con la NOM-141.

- Borde libre: Es la diferencia de elevaciones entre la zona más alta de la cortina contenedora y el nivel

de aguas maximas extraordinarias (NAME).

- Borde iniciador: Estructura inicial de la cortina contenedora.
- Cauce de corriente: Canal natural o artificial para que las aguas de la creciente máxima ordinaria escurran sin derramarse.
- Cortina contenedora: Estructura resistente que delimita y soporta el empuje de los jales y del agua almacenada.
- Jales: Residuos generados en las operaciones de separación y concentración de minerales.
- NAME: Es el nivel máximo que alcanza el agua dentro del vaso de almacenamiento de la presa de jales al desfogar por el vertedor de excedencias la tormenta de diseño.
- Playa: Es un lugar que existe entre la corona de la cortina contenedora y el nivel de aguas máximas de operación.
- Vaso de almacenamiento: Elemento de la presa que tiene volumen disponible para almacenar los sólidos de jales, una porción del agua empleada en su transporte y el volumen para manejar las aguas pluviales que caen dentro de la presa.

En la figura 2.6 se presenta el borde contenedor de la presa de jales indicado entre flechas para una mejor visualización.



Figura 2.6: Borde de la presa de jales

En la figura 2.7 se observa una parte con mucho pasto, la cual corresponde a la cresta de la presa, la cual ya está cerrada y fuera de operación al día de hoy, después de su cierre en los años pasados. En la parte izquierda de la imagen se aprecia su borde, el cual sirve como protección y delimitación.



Figura 2.7: Cresta y borde de la presa de jales

En nuestro país se tienen que construir presas de almacenamiento de residuos en la industria minera, esto es con la finalidad de que tenga una correcta post-operación al haber explotado lo necesario de la mina y para que ese suelo vuelva a ser utilizado.

De acuerdo con el boletín 181 de la International Commission on Large Dams (ICOLD) [16] los jales se clasifican como:

Tipo de jale	Símbolo	Descripción
Partículas gruesas	CT	Arena
Roca sana	HRT	Limo arenoso
Roca alterado	ART	Limo arenoso con arcilla
Jal fino	FT	Limo con trazas de arcilla
Jal ultra fino	UFT	Arcilla limosa

Tabla 2.2: Clasificación de jales mineros

Conforme sea más fino el jal, es más difícil de clasificar y, de acuerdo con las características que tiene, va a jugar un papel en el diseño así como en la construcción de la presa de jales mineros, que será una sección que veremos a continuación.

Criterios para la construcción y operación de una presa de jales mineros

En el caso de las construcciones se considera una serie de condiciones tanto del lugar de construcción como los aspectos climáticos, esto con la idea de evitar daños y evitar que se genere carga hidráulica sobre la cortina contenedora. o que se produzca algún acontecimiento de excedencias hacia la cuenca de aguas abajo. Estos aspectos son:

- Zona hidrológica: de la ubicación del sitio que nos da como referencia [2] se tiene que el sitio de estudio se encuentra en la zona catalogada como húmeda y muy cerca de la zona ciclónica.
- Precipitación media mensual o anual
- Máximos y mínimos de precipitación mensual y anual.
- Tormenta máxima durante un día.
- Tormenta de diseño: Que es para un período de retorno establecido con la clasificación del jal, zona hidrológica y topografía.

- Velocidad, dirección, frecuencia de los vientos.

2.1.1 Criterios para la elección y construcción de una presa de jales mineros

A continuación, se indican algunos aspectos de importancia sobre la decisión en la elección del lugar y manera constructiva de la presa.

1. No hay elementos para considerar que el acuífero no esta comprometido y el jal no es peligroso.
2. El sitio debe incluir medidas de prevención o control con obras ingenieriles.
3. El agua de la presa se recircula por lo cual debe evitarse el contacto con cuerpos de agua superficial.
4. En caso de que exista una especie de flora o fauna en riesgo debe salvaguardarse la integridad de estas.
5. Cuando la capa del suelo se retira para presevar el germoplasma debe de protegerse la zona para evitar perdidas de suelo.
6. El sitio debe ser capaz de soportar y almacenar el volumen de jales.

Para elegir de manera eficiente este proceso, hay que considerar los siguientes criterios:

1. Estimar el volumen de almacenamiento.
2. La cortina contenedora debe cumplir con la estabilidad.
3. Los escurrimientos superficiales deben respetar el Manual de Diseño de obras civiles de (CFE) y los manuales de la Comisión Nacional de Agua.
4. Para los sistemas de recuperación deben contemplar escurrimientos pluviales que aportan carga hidráulica.
5. La cortina contenedora debe ser formada por suelos y materiales definidos con fragmentos de roca.

Construcción y operación

Aquí se consideran las acciones a realizar para la correcta construcción y operación de una presa, lo cual es de suma importancia porque, si se apresura la construcción, puede haber un riesgo en las operaciones.

1. No puede haber degradación en la calidad del agua que existe en la zona.
2. Debe hacerse una excavación limpia para eliminar toda la materia vegetal, suelos, fragmentos de roca suelta. Esto con la finalidad de obtener un buen contacto entre la base de la cortina contenedora y la superficie del terreno natural.
3. En caso de que en la zona de desplante de la cortina contenedora o del bordo iniciador haya defectos tales como arcillas agrietadas, grietas abiertas en roca, depósitos de materiales de derrumbe, etc. Habrá que remediarlas con el fin de evitar tubificación debajo de la cortina contenedora o el bordo iniciador.
4. Si hay una cortina o bordo iniciador sobre una superficie rocosa inclinada que suele estar lisa debe anclar.

5. Se debe revisar el grado de compactación y humedad que hayan sido estipulados para el proyecto.
6. Si el envío de los jales se hace por gravedad a través de canales abiertos hay que asegurar que no existieran derrames e infiltraciones.
7. Para aguas arriba la distribución de los jales sobre la cortina contenedora debe iniciar en la parte inferior del talud de la cortina, esto para permitir que los sólidos más gruesos se depositen en la parte más cercana a esta y que los más finos queden en la parte más alejada. Con esto garantiza la formación del estanque alejado a la cortina lo cual favorece el sellado del vaso del depósito con lo fino de los jales.
8. Los primeros jales depositados deben retenerse para que el agua contenida en ellos se clarifique y se pueda extraer para reutilizarla.
9. Además de otras condiciones específicas para la construcción, pero lo que es importante para este trabajo es la posoperación ya que es el momento en el que se tomaron los datos.

Postoperación

1. Se debe garantizar que partículas sólidas no sean emitidas a la atmósfera, como resultado de la pérdida de humedad de superficie; No se pueden formar escurrimientos que afecten a cuerpos de agua superficial y subterráneos.
2. Se presentan consideraciones por si son generadores de ácido.
3. Los jales se pueden cubrir con agua para evitar el drenaje ácido, solo en caso de que el proyecto lo permita.
4. Es obligatorio que la superficie del depósito debe ser cubierta con el suelo recuperado.
5. Las especies vegetales que sean utilizadas deben corresponder a la región en que se está haciendo.
6. En caso de ser necesario la cortina contenedora debe ser ajustada para dar una inclinación que garantice estabilidad.

2.1.2 Tipos de presas de jales mineros

Existen tres tipos de presas:

- Aguas arriba
- Aguas abajo
- Aguas de línea central

Cualquier presa de jales mineros tiene cuatro elementos principales en su estructura, los cuales son:

- La cortina contenedora
- El vaso de almacenamiento
- El sistema decantador drenante
- El vertedor de excedencias

Aguas arriba con enrocamiento

(Jaime y Sanabria, 2018) [17] definen terraplén con sistema para la línea de descarga conformado con roca de desecho, rellenos o relaves permeables. En este tipo de presa se construye primero el bordo iniciador (4) en la figura 2.8 y sobre ese se va a construir el resto de la presa. Los jales se descargan en la presa y a medida que se eleva el desnivel se construye un nuevo muro. El cual va a estar apoyado en la parte superior de la pendiente. De acuerdo a la NOM 141 (Diario de la federación,2004) la distribución de los jales sobre la cortina contendora debe iniciar desde la parte interior del talud de la cortina, esto para que los sólidos más gruesos se depositen en esta parte y los más finos en lo más lejano. Esto se hace con el fin de garantizar la formación del estanque alejado de la cortina, evitando la saturación en el talud exterior.

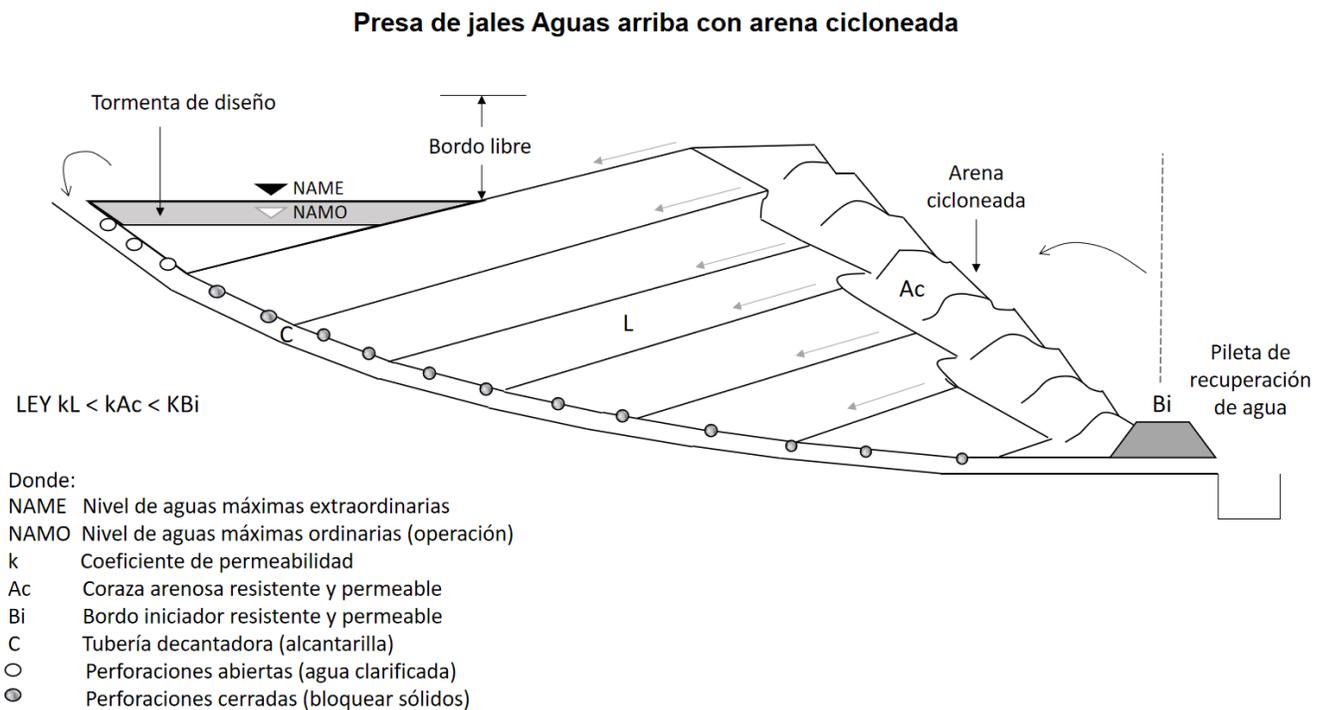
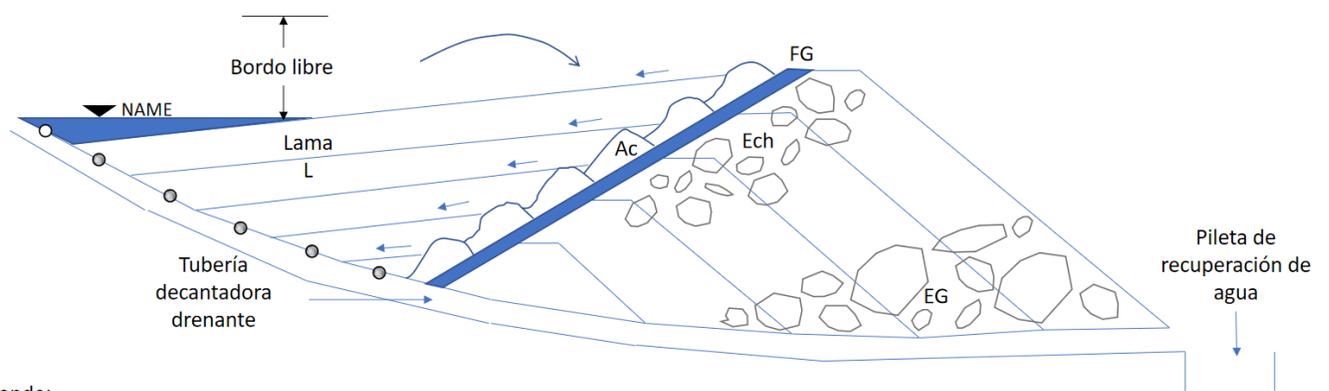


Figura 2.8: Esquema teórico de presa de jales aguas arriba con enrocamiento [2]

Jal Aguas abajo

Para este tipo de jales el terraplén está construido de material seleccionado como se muestra en la figura 2.9. Consiste en ir formando la cortina contendora a partir del vaso de almacenamiento hacia afuera, mediante arena de ciclón compactada. La cortina contendora va del bordo iniciador hacia arriba y hacia afuera hasta topa con el bordo terminal.

Presas de jales Aguas abajo con enrocamiento



Donde:

NAME Nivel de aguas máximas extraordinarias

NAMO Nivel de aguas máximas ordinarias (operación)

k Coeficiente de permeabilidad

Ac Arena cicloneada

Fg Filtro de grava y arena

Ech Enrocamiento chico

Eg Enrocamiento grande

○ Perforaciones abiertas (agua clarificada)

● Perforaciones cerradas (bloquear sólidos)

$$LEY \ k_L < k_{Ac} < k_{Fg} < k_{Ech} < k_{Eg}$$

Figura 2.9: Esquema teórico de presa de jales aguas abajo con enrocamiento

3 Métodos geofísicos. Conceptos teóricos

Esta sección aborda los fundamentos teóricos de los métodos geofísicos utilizados en el presente trabajo, proporcionando el marco conceptual necesario para interpretar de manera adecuada los resultados que se presentan y discuten en capítulos posteriores.

3.1 Refracción sísmica

El método de refracción sísmica tiene sus fundamentos teóricos en la propagación de ondas sísmicas, esto a partir de los tiempos de arribo registrados en superficie, de los rayos sísmicos que se propagan en el subsuelo, los cuales son generados en la misma superficie. (Telford,1990)[18]

Se hace a partir de tres factores de importancia. (Kearey et al., 2013)[19]

- **Mecanismo de la fuente** puede que sean explosivos o manuales sin embargo se tiene el control de la onda que viaja a través del subsuelo.
- **Zona del subsuelo** en el cual se propagan las ondas sísmica, las que logran regresar a la superficie por el contraste de propiedades elásticas
- **Sistema de registro** se compone de una serie de detectores llamados geófonos que están conectados a un cable que recoge los eventos que llegan a la superficie y son almacenados en un sismógrafo.

se supone que las ondas sísmicas viajan desde la fuente a través del medio más superficial hasta contactar con un segundo medio de mayor velocidad; la incidencia de las ondas con el segundo medio es de tal forma que cambian la dirección del rayo, viajando ahora en la interfaz de ambos medios. Este principio del ángulo de incidencia se analiza a partir de la ley de Snell

$$\frac{\sin(\theta_i)}{v_1} = \frac{\sin(\theta_r)}{v_2} \quad (3.1)$$

Donde θ_i es el ángulo de incidencia de la onda o también conocido como ángulo crítico, θ_r el ángulo de refracción, y v_1, v_2 las velocidades sísmicas de la primera y segunda capa respectivamente (Telford et al., 1990) [18].

Ahora tenemos que el tiempo que recorre el rayo desde la fuente hasta llegar a la superficie, con una interfaz a una profundidad z y para un geófono localizado a una distancia x de la fuente definido como offset.

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2z \cos(\theta_i)}{v_1} = \frac{x}{v_2} + t_i \quad (3.2)$$

Por lo tanto, vamos a definir t_i como el tiempo de intercepción, que representa el tiempo adicional que la onda invierte en viajar verticalmente hasta la interfaz y de regreso (Sheriff & Geldart, 1995)[20].

$$t_i = \frac{2z \cos(\theta_i)}{v_1} \quad (3.3)$$

A continuación, la onda va a cambiar su recorrido, de modo que será reflejada hacia la superficie. Para que la ley de Snell se vea satisfecha, vamos a tener que el ángulo con el cual será reflejada hacia la superficie,

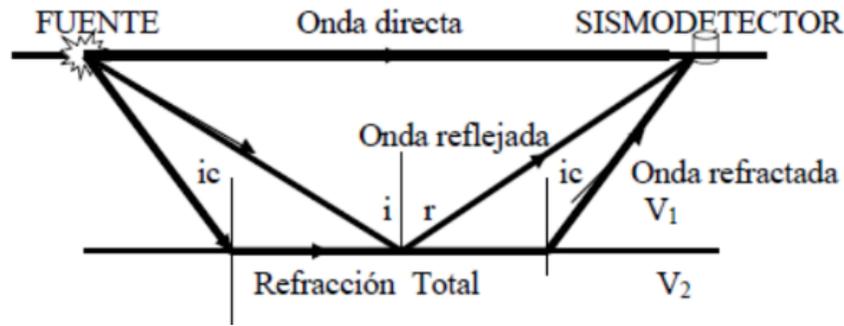


Figura 3.1: Esquema teórico del viaje de ondas sísmicas (modificado de Adepelumi & Olorunfemi, 2015) [72].

tal que será mismo que el ángulo con el que había incidido. Al colocar receptores o mejor conocidos como **geófonos** en la superficie, se detectará el arribo de esta onda denominada como onda refractada

Partimos de un modelo de dos capas horizontales en el cual, con los datos que ya fueron registrados, se busca identificar el tiempo de arribo de la primera onda (onda refractada) visible en los datos. Con esta información de los tiempos de arribo en cada geófono, se construye un perfil de dromocronas, la cual es una gráfica de distancia contra tiempo; a partir de esto se tiene una pendiente (definida por el tiempo sobre la distancia), cuyo recíproco (distancia sobre tiempo) y con ello se obtiene la velocidad. Al momento de que la onda refractada arribe antes que la onda directa, la pendiente presentará un cambio debido a que la onda viaja y llega a mayor velocidad a partir de cierto geófono; es decir, se tendrá una dromocrona con dos pendientes distintas.

Una vez que se tienen las velocidades, se puede obtener el coseno del ángulo con la identidad trigonométrica siguiente

$$\cos^2(\theta_i) = 1 - \sin^2(\theta_i) \quad (3.4)$$

Retomando la ecuación 1.3 de la cual podemos obtener la profundidad a partir del despeje de z , el cual queda como (Palmer, 1980)[21].:

$$Z = \frac{t_i v_1}{2 \cos(\theta_i)} = \frac{t_i v_1 v_2}{2(v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.5)$$

Finalmente, este conjunto de herramientas teóricas permite interpretar con alta precisión las condiciones estructurales y litológicas del subsuelo, especialmente útil en estudios de cimentaciones, hidrogeología y exploración geotécnica (Kearey et al., 2013)[19]; Telford et al., 1990)[18].

3.1.1 Inversión de Refracción sísmica

Software libre

Refrainv.py implementa dos enfoques complementarios para interpretar tiempos de arribo de refracción: (i) *inversión por términos de tiempo* y (ii) *tomografía de tiempo de viaje*

Inversión por términos de tiempo

El primero entrega espesores y velocidades efectivas de capas someras a partir de términos fuente–receptor; el segundo reconstruye un campo de velocidades mediante inversión regularizada con trazado de rayos y cálculo de tiempos en mallas [22].

La hipótesis es que el tiempo primer–arribo entre el tiro j y un receptor i se descompone como

$$t_{ij} = \frac{x_{ij}}{v_2} + \Delta s_j + \Delta g_i, \quad (3.6)$$

donde x_{ij} es la distancia fuente–receptor, v_2 es la velocidad de la capa que refracta, y Δs_j , Δg_i son los *términos de tiempo* asociados a la estructura somera bajo la fuente y el receptor, respectivamente [23]. Esta formulación lineal se resuelve por mínimos cuadrados ponderados: $\mathbf{m} = \arg \min \|\mathbf{W}_d(\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})\|_2^2$, con desconocidos $\mathbf{m} = \{1/v_2, \Delta s_j, \Delta g_i\}$.

Una vez estimados los Δ , la profundidad perpendicular a la refractora bajo la fuente o el receptor se calcula con

$$h = \frac{\Delta v_1}{\cos i_c}, \quad i_c = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_2}\right), \quad (3.7)$$

donde v_1 es la velocidad de la capa superficial y i_c el ángulo crítico. La ecuación (3.7) se deduce de la definición de *delay time* $\Delta = h \cos i_c / v_1$ y la ley de Snell [24].

Tomografía de tiempos de viaje

Para una heterogeneidad lateral, `Refrainv.py` utiliza el flujo de inversión de `pyGIMLi`. El modelo es la *lentitud* $s(\mathbf{x}) = 1/v(\mathbf{x})$ discretizada en una malla. El problema directo que calcula los tiempos se resuelve con trazado de rayos por *camino más corto* tipo Dijkstra o, de forma opcional, por *Fast Marching Method* (FMM); ambos están disponibles en el módulo de refracción de `pyGIMLi` [25]. La inversión minimiza una función objetivo Tikhonov/Occam:

$$\Phi(\mathbf{m}) = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{t}^{\text{obs}} - \mathbf{t}^{\text{cal}}(\mathbf{m}))\|_2^2 + \lambda^2 \|\mathbf{L}\mathbf{m}\|_2^2, \quad (3.8)$$

con \mathbf{L} operador de suavizado de primera/segunda diferencia y λ el factor de regularización. `pyGIMLi` aplica transformaciones para garantizar positividad de la lentitud y resuelve el sistema linealizado iterativamente (Gauss–Newton), actualizando rayos y tiempos a cada iteración, hasta lograr un ajuste compatible con los errores asignados. El resultado es un campo $v(x, z)$ y la respuesta ajustada (curvas $t-x$) que permiten analizar cobertura de rayos y resolución.

3.1.2 Software comercial

El software comercial implementa un enfoque que combina el problema directo y el inverso.

Para el problema directo, se utiliza un algoritmo del *camino más corto* (shortest path method), el cual busca, entre todos los trayectos posibles entre la fuente, el reflector y el receptor, aquel que presenta el menor tiempo total de propagación. El cálculo del tiempo de viaje t se realiza mediante la integral:

$$t = \int_{\text{trayectoria}} \frac{ds}{v(s)}$$

donde $v(s)$ es la velocidad del medio a lo largo del trayecto ds .

Para el problema inverso, este software asume un modelo compuesto por capas horizontales, cada una caracterizada por una velocidad constante. A partir de los tiempos de arribo observados t_{obs} y los tiempos calculados t_{calc} , se plantea un problema de mínimos cuadrados lineales:

$$\min \sum_{i=1}^N (t_{obs,i} - t_{calc,i})^2$$

donde N corresponde al número de observaciones. Este procedimiento ajusta las velocidades y espesores de las capas para lograr el mejor acuerdo entre los datos medidos y el modelo teórico [26, 27].

3.2 MASW

MASW es un método rápido para evaluar perfiles de velocidad cercanos a la superficie, pero también tiene problemas: los arribos más fuertes suelen ser los primeros, es decir, eventos de refracción que pueden llevarnos a un error de identificación y manejo de datos durante la realización del análisis de acuerdo a (Park,1999)[28].

(Park, 1997) [28] es el que introduce MASW como alternativa al método que se usaba antes, SASW. A continuación hablaremos un poco más sobre las consideraciones que toma Park: la propagación de la onda a partir de su longitud. También menciona que un correcto análisis consta de 3 partes: **Adquisición** de las ondas superficiales, **Construcción** de la curva de dispersión e **Inversión** para obtener las velocidades de onda S; la velocidad de corte de onda S es proporcional al módulo de corte, que a su vez está relacionado con la rigidez del material; es por esto que este método nos ayuda, ya que logramos conseguir más información con los mismos datos que ya fueron tomados para refracción sísmica [29].

El método, de manera matemática, establece que los dos tipos de ondas superficiales son Rayleigh y Love; las primeras se generan de manera más eficiente en todo tipo de superficie usando fuentes verticales. Ambas satisfacen las ecuaciones de elasticidad ondulatoria (Aki,2002) [30]:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = V_p^2 \nabla^2 \Theta \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = V_s^2 \nabla^2 \Psi \quad (3.10)$$

donde Ψ y Θ son los potenciales de desplazamiento, V_p y V_s las velocidades de las ondas P y S, respectivamente. Las ondas de Rayleigh tienen partículas que se mueven en dirección vertical, mientras que las ondas Love presentan desplazamientos predominantemente horizontales.

Aspectos importantes sobre longitud de onda y profundidad de penetración (Foti,2014) [29]:

- Longitud de onda corta → Profundidad somera
- Longitud de onda larga → Profundidad mayor
- La velocidad de propagación para cada longitud de onda se denomina velocidad de fase

Ahora veremos que influyen otros factores como la velocidad de onda S (V_s), la velocidad de onda P (V_p), la densidad (ρ) y el coeficiente de Poisson (σ). La velocidad de fase es usualmente el 92 % de la velocidad de onda S [29], y el coeficiente de Poisson suele oscilar entre 0.88 y 0.95 para el rango $\sigma = 0-0.5$.

El módulo de corte μ se relaciona con la densidad y la velocidad de onda S mediante:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad \mu = V_s^2 \rho \quad (3.11)$$

Los campos de onda que viajan horizontalmente consideran: Espaciamiento de geófonos (dx), frecuencia (f) y velocidad de fase (C_f), basada en los arribos de onda superficial en dos receptores:

$$C_f = \frac{dx}{\Delta t_f} \quad (3.12)$$

Este análisis produce un conjunto de datos (f, C_f).

La *curva de dispersión*, en su forma más general, es una gráfica de frecuencia versus velocidad de fase. El perfil de V_s se construye a partir de estos datos; de ahí la importancia de identificar correctamente las curvas de dispersión, uno de los mayores retos de este trabajo (véanse las curvas en el Anexo [31]). Si la curva de dispersión no está bien construida, se generan errores localizados, algo común cuando los datos de campo tienen baja calidad; es aquí donde la pericia del operador resulta fundamental.

De acuerdo con (Foti,2014)[29], la efectividad del resultado final depende de las decisiones durante la adquisición, es decir, los parámetros de disparo y configuración de los receptores, así como del procesado posterior de los datos.

Si el modelo resultante es incorrecto, la causa se atribuye al operador y al analista de los datos, y no a una propagación inadecuada de las ondas sísmicas.

No existe una diferencia significativa en la estimación de la velocidad de fase al emplear 70, 35 o 18 trazas, pues esta velocidad se define por cambios de pendiente que se pueden caracterizar con pocos puntos. Lo que realmente importa es la longitud del arreglo, ya que controla la longitud de onda máxima registrada y, por tanto, la profundidad de investigación; la curva de dispersión en bajas frecuencias es proporcional a la longitud del arreglo, no al número de canales.

El espaciamiento entre geófonos, a diferencia de la refracción, no limita la resolución vertical del método de ondas superficiales; dicha resolución está gobernada por las leyes de la dispersión y decrece con la profundidad, de modo que las capas superficiales se definen con mayor detalle, mientras que, a mayor profundidad, el espesor mínimo de capa discernible aumenta.

3.2.1 Inversión de MASW

En el análisis de ondas superficiales mediante el módulo MASW, este software realiza un proceso en dos etapas. Primero, se obtiene la curva de dispersión, que describe la relación entre la frecuencia f y la velocidad de fase $c(f)$ de la onda de corte fundamental. Esta se extrae a partir del análisis espectral en el dominio frecuencia–número de onda ($f - k$).

El siguiente paso consiste en la inversión de la curva de dispersión. Se asume un modelo inicial de capas horizontales, cada una definida por la velocidad de onda S (V_s), la velocidad de onda P (V_p), el espesor y el módulo de Poisson. El algoritmo ajusta estos parámetros para minimizar la diferencia entre la curva de dispersión observada $c_{obs}(f)$ y la calculada $c_{calc}(f)$, nuevamente mediante un enfoque de mínimos cuadrados:

$$\min \sum_{j=1}^M (c_{obs}(f_j) - c_{calc}(f_j))^2$$

donde M corresponde al número de frecuencias consideradas.

El resultado de la inversión se expresa como un perfil Vs en función de la profundidad Z, el cual permite caracterizar las propiedades dinámicas del subsuelo [26].

3.3 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

La tomografía de Resistividad Eléctrica, o por sus siglas TRE, es la distribución del potencial en la superficie de una tierra estratificada horizontalmente (Reynolds, 2011)[32].

Se supone que:

- Medio estratificado
- Estratos homogéneos
- Fuente puntual
- Corriente directa

(Telford,1990),(Keller,1996)[18, 33]

Su base matemática consiste en la ecuación de Laplace para coordenadas cilíndricas; lo primero que se hace es determinar soluciones particulares para después llegar a la solución general como combinación lineal de las particulares (Keller,1966)[33].

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{Ur} \frac{\partial U}{\partial r} = -\lambda; \quad \frac{1}{W} \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \quad (3.13)$$

A continuación se busca una solución de la forma $U(r)$

$$U = CJ_0(\lambda r) \quad (3.14)$$

donde J_0 es la función de Bessel de orden cero y C, λ son constantes arbitrarias.

Para $W(z)$ se obtienen dos soluciones, $W = Ce^{-\lambda z}$ y $W = Ce^{\lambda z}$, y para $V(r, z)$ se obtienen $V = Ce^{-\lambda z} J_0(\lambda r)$ y $V = Ce^{\lambda z} J_0(\lambda r)$.

Lo que sigue es sumar el potencial generado por una fuente principal, lo cual se expresa como:

$$V(r, z) = \frac{\rho_I I}{2\pi \sqrt{r^2 + z^2}} \quad (3.15)$$

en la que ρ_I es la resistividad de una tierra homogénea e I la intensidad de corriente eléctrica (Telford,1990)[18].

Reescribiendo como integral de Lipschitz, solución general de $V(r, z)$:

$$V(r, z) = \frac{\rho_I I}{2\pi} \int_0^{2\pi} [e^{-\lambda z} + \Theta(\lambda)e^{-\lambda z} + X(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3.16)$$

donde $\Theta(\lambda)$ y $X(\lambda)$ son funciones arbitrarias de λ .

En caso de una fuente puntual en superficie, debemos escribir expresiones en diferentes estratos; en lugar de $V(r, z)$ usamos V_i , donde i corresponde a los distintos estratos del subsuelo.

Las tomografías eléctricas constituyen un sondeo 2D; se contemplan varias condiciones para determinar el arreglo a emplear (Loke,2015)[34]:

- El objetivo del estudio
- Restricciones del medio
- Restricciones de tiempo
- Mediciones de polarización inducida

Los datos que se obtienen presentan una *pseudosección* aparente. Cuanto mayor sea la separación de los dipolos, mayor será la profundidad (nivel) de la pseudosección (Dahlin,2004)[35].

Los arreglos utilizados en este trabajo son Dipolo–Dipolo y Wenner–Schlumberger.¹

El arreglo depende de la estructura a localizar, la sensibilidad del receptor y el nivel de ruido; además presenta las siguientes características (Loke,2015)[34]:

- Intensidad de señal
- Cobertura horizontal
- Profundidad de investigación
- Sensibilidad del arreglo a cambios laterales y verticales en la resistividad

La **sensibilidad** describe la forma en que las pseudosecciones producidas por distintos arreglos sobre la misma estructura cambian. Esta función puede indicar la profundidad de investigación y la influencia de cada región del subsuelo en la medición; a mayor valor de la función, mayor influencia tendrá esa región (Loke,1999)[36]. De manera matemática se define como

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_i}$$

medida de cómo la resistividad aparente observada es sensible a cambios en la resistividad del subsuelo.

En este trabajo se utilizó el acomodo Dipolo–Dipolo el cual emplea un par de electrodos de corriente los cuales usualmente están denotados con las variables A y B, con estos electrodos se hace la inyección de corriente y con los de potencia que tienen notación M N se mide la diferencia del voltaje. A y B están separados por una distancia a al igual que M y N y entre ellos una separación llamada na .

Se introduce el concepto de factor geométrico k que depende de n y de a .

$$K = \pi a n(n + n)(n + 2)$$

su comportamiento físico es que incrementa de acuerdo a la profundidad que se pretende investigar.

¹Agregar imágenes ilustrativas.

A partir de estas mediciones se pueden obtener la ρ_a que es la resistividad aparente que responde a la densidad en caso de un suelo uniforme, el cual no existe en la realidad, de allí su nombre de resistividad aparente. Matemáticamente se define como:

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

donde ΔV es la razón de cambio que existe para el voltaje mientras I es la corriente inyectada. para conocer las variaciones laterales de resistividad a cierta profundidad se varía el espaciamiento entre geófonos. (Stummer, et al.,2004) [37] y también describiré Wenner–Schlumberger (Dahlin,2004) [38] el cual no fue utilizado para este trabajo, es relevante para entender la teoría detrás de la tomografía de resistividad eléctrica (TRE).

Para este arreglo se utilizan cuatro electrodos donde A y B son los de corriente y están ubicados a los extremos, mientras que los electrodos de potencial M-N están en el centro, existe una separación básica a entre los electrodos M,N mientras que la separación entre los electrodos de corriente se amplía en múltiplos de na .

En este caso la resistividad aparente ρ_a donde el factor geométrico está definido por:

$$K_{WS} = \pi n(n + 1)a$$

donde:

a es la separación entre los electrodos MN.

n va a ser el que determina la profundidad de investigación por el factor geométrico.

na es la mitad de la separación entre los electrodos de corriente A-B.

En la figura 3.2 se muestran imágenes sobre la disposición de un arreglo dipolo-dipolo y Wenner Schlumberger

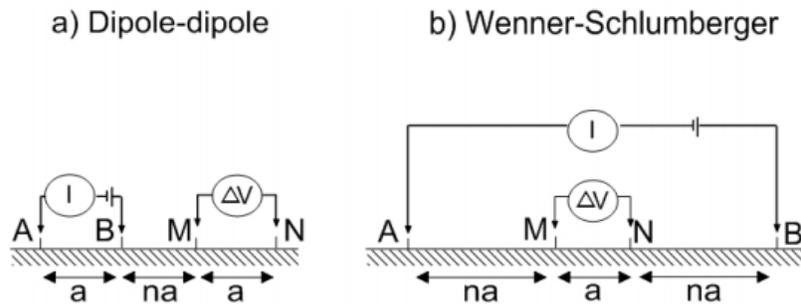


Figura 3.2: Esquema de los arreglos utilizados en Tomografía de Resistividad Eléctrica. a) Arreglo Dipolo–Dipolo, b) Arreglo Wenner–Schlumberger. Tomado de (Audebert,2016) [39]

3.3.1 Inversión de Tomografía de refracción sísmica

El software libre para tomografía de resistividad eléctrica (TRE) que desarrolla (Blanchy et al., 2020). [40] , está basado en la resolución numérica del problema directo por elementos finitos en un dominio con topografía y la inversión regularizada tipo Occam/Tikhonov resuelta de manera iterativa (Gauss-Newton). El problema directo modela el potencial eléctrico $\phi(\mathbf{x})$ bajo condiciones cuasiestáticas mediante la ecuación de

continuidad.

$$\nabla \cdot (\sigma(\mathbf{x}) \nabla \phi(\mathbf{x})) = -I \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{src}}),$$

donde $\sigma = 1/\rho$ es la conductividad (inversa de la resistividad ρ), I la corriente inyectada y δ la fuente puntual. La discretización por elementos finitos lleva a un sistema lineal simétrico y definido positivo que se resuelve para las configuraciones de medición. A partir de los potenciales en electrodos se calculan las resistividades aparentes. Con topografía, el dominio se extiende lateralmente y en profundidad para minimizar la influencia de las fronteras; se imponen condiciones de flujo nulo o mixtas apropiadas para evitar artefactos en la región de interés.

La inversión estima un modelo \mathbf{m} representado usualmente en términos de $\log \rho$, minimizando una función objetivo con dos términos: ajuste de los datos y la regularización del modelo.

$$\Phi(\mathbf{m}) = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))\|_2^2 + \lambda^2 \|\mathbf{L}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\text{ref}})\|_2^2,$$

donde:

- \mathbf{d}^{obs} son los datos medidos.
- $\mathbf{f}(\mathbf{m})$ es la predicción del problema directo.
- \mathbf{W}_d pondera el modelo de error.
- \mathbf{L} es un operador de suavidad.
- λ es el parámetro de regularización que gobierna el equilibrio ajuste- suavidad.

La relación no lineal entre datos y el modelo se linealiza con cada iteración mediante el Jacobiano \mathbf{J} , el cual corresponde a sensibilidades de los datos respecto a \mathbf{m} , calculadas de modo que:

$$\mathbf{f}(\mathbf{m} + \Delta\mathbf{m}) \approx \mathbf{f}(\mathbf{m}) + \mathbf{J} \Delta\mathbf{m}, \quad \text{donde el incremento } \Delta\mathbf{m} \text{ se obtiene de:}$$

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \lambda^2 \mathbf{L}^T \mathbf{L}) \Delta\mathbf{m} = \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d (\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{f}(\mathbf{m})).$$

La actualización $\mathbf{m} \leftarrow \mathbf{m} + \Delta\mathbf{m}$ se acompaña con una línea de búsqueda y usa el método de Mínimos Cuadrados Ponderados Iterativos que es un algoritmo que estima los coeficientes de regresión resolviendo es decir va definiendo pesos por residuo para atenuar la influencia de *puntos botados* o datos de baja confiabilidad. La regularización puede incluir suavidad isotrópica o anisotrópica (α_x, α_z en \mathbf{L}), y *Ponderación por profundidad* para compensar la pérdida de sensibilidad con la profundidad por último restricciones, (cotas, *enmascaramiento* en zonas sin cobertura). El parámetro λ se selecciona con criterio de discrepancia (hacer $\chi^2 \approx 1$) se ajusta para lograr un residuo compatible con la incertidumbre de medición sin sobreajustar el ruido.

El proceso termina cuando la reducción relativa de Φ es mínima, cuando χ^2 se estabiliza alrededor de 1 o al alcanzar el número máximo de iteraciones. Las salidas comprenden el modelo invertido $\rho(\mathbf{x})$, mapas de sensibilidad, estadísticos de ajuste por dato, residuos normalizados y secciones, histogramas; ya que se tienen estos resultados, se puede juzgar la resolución y la confiabilidad. El desempeño del algoritmo depende de la calidad y homogeneidad de las lecturas, del control de recíprocos y del modelo de error, así como de la cobertura geométrica, es decir, configuración de electrodos, extensión y topografía.

4 Metodología

Con el objetivo de estudiar las propiedades sísmicas y eléctricas de la presa de jales, se dispusieron perfiles en diferentes partes de la presa de jales, que está diferenciada en 2 partes, TSF-01 y TSF-02. En el caso del TSF-01 se realiza una campaña de exploración sísmica y eléctrica en el terreno, así como en diferentes niveles de este depósito de jales. El objetivo es investigar la estructura de este depósito de jales, así como inferir el tipo de depósitos de suelo presentes en esta unidad. Para el caso del TSF-02, la exploración solo fue sísmica y se enfocará a nivel del terreno. El estudio comprende la realización de pruebas en su modalidad refracción sísmica (TRS) para perfiles sísmicos bidimensionales de ondas de compresión (V_p), ondas superficiales activas (MASW) para la obtención de perfiles de velocidad de corte (V_s), y perfiles bidimensionales de resistividad eléctrica (TRE). Estos estudios otorgan la respuesta del subsuelo en secciones en las cuales se pueden ver una serie de características; como es la presencia de agrietamientos, zonas con mayor concentración de humedad, zonas de mayor compactación, entre otras propiedades. En las figuras 4.1 y 4.3 se muestra la ubicación de la estructura TSF-01 y TSF-02 y la distribución de las líneas de TRS y TRE; y en las Tablas 4.1 y 4.2 se presenta un resumen con las características de los trabajos geofísicos realizados por técnica geofísica y ubicación. Para el caso de la refracción sísmica y estudio de ondas superficiales se tienen las mismas ubicaciones. Los trabajos se realizaron en agosto de 2022.

4.1 Exploración sísmica

El equipo que se empleó para el estudio de refracción sísmica y de ondas superficiales consiste en un sismógrafo Geode de la marca Geometrics de 24 canales; 24 geófonos verticales de 4.5 [Hz] espaciados de manera equidistante a 5 m. La configuración del equipo consiste en muestreo de 8000 [mps], 1 segundo de registro y 5 fuentes activas distribuidas en los extremos y 3 tiros intermedios frente a los geófonos 6, 12 y 18. Se realizaron 16 tendidos sísmicos cuyas características se enuncian en la tabla 4.1

Se presentan imágenes que corresponden al trabajo en campo para la adquisición de datos, la figura 4.1 corresponde a la sección 108 con lo que se ejemplifica una fuente en esta sección. Se golpea una placa de metal colocada en el suelo para obtener la traza sísmica.



Figura 4.1: Adquisición de datos en campo para línea 108

Ahora en la figura 4.2 se aprecia la parte inicial de la línea de refracción en la cual se coloca el operador de la consola en la cual transmite y observa la traza sísmica recién generada, aquí se revisa la calidad de los datos y se va llenando la bitácora del levantamiento para tener un control de los mismos.



Figura 4.2: Operación de consola en la adquisición de datos en campo para refracción sísmica

Código de ensayo	Longitud Realizada (m)	Ubicación	Nivel																															
LR-101	230	TSF-01	Terreno																															
LR-102	230	TSF-01	15 m																															
LR-103	230	TSF-01	10 m																															
LR-104	345	TSF-01	Terreno																															
LR-105	345	TSF-01	Terreno																															
LR-106	276	TSF-01	Terreno																															
LR-107	230	TSF-01	25 m																															
LR-108	230	TSF-01 </tr <tr> <td>LR-109</td> <td>230</td> <td>TSF-01</td> <td>25 m</td> </tr> <tr> <td>LR-110</td> <td>150</td> <td>TSF-01</td> <td>25 m</td> </tr> <tr> <td>LR-111</td> <td>150</td> <td>TSF-01</td> <td>25 m</td> </tr> <tr> <td>LR-112</td> <td>150</td> <td>TSF-01</td> <td>25 m</td> </tr> <tr> <td>LR-113</td> <td>150</td> <td>TSF-01</td> <td>25 m</td> </tr> <tr> <td>LR-114</td> <td>150</td> <td>TSF-01</td> <td>25 m</td> </tr> <tr> <td>LR-115</td> <td>275</td> <td>TSF-02</td> <td>Terreno</td> </tr> <tr> <td>LR-116</td> <td>275</td> <td>TSF-02</td> <td>Terreno</td> </tr>	LR-109	230	TSF-01	25 m	LR-110	150	TSF-01	25 m	LR-111	150	TSF-01	25 m	LR-112	150	TSF-01	25 m	LR-113	150	TSF-01	25 m	LR-114	150	TSF-01	25 m	LR-115	275	TSF-02	Terreno	LR-116	275	TSF-02	Terreno
LR-109	230	TSF-01	25 m																															
LR-110	150	TSF-01	25 m																															
LR-111	150	TSF-01	25 m																															
LR-112	150	TSF-01	25 m																															
LR-113	150	TSF-01	25 m																															
LR-114	150	TSF-01	25 m																															
LR-115	275	TSF-02	Terreno																															
LR-116	275	TSF-02	Terreno																															

Tabla 4.1: Resumen de trabajos sísmicos de refracción realizados en TSF-01 y TSF-02.

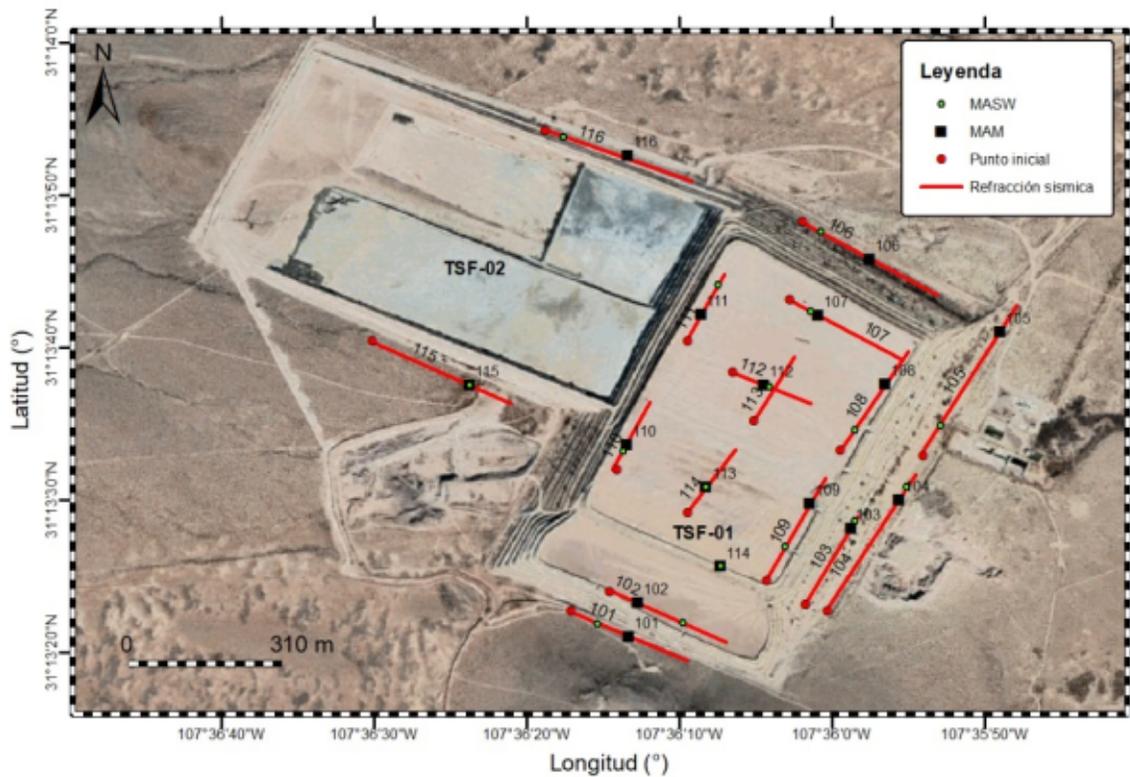


Figura 4.3: Croquis en planta de la campaña de exploración sísmica en la zona de estudio. Los puntos rojos indican el inicio de la línea. Los puntos verdes indican la localización del punto de atribución MASW. Escala 1:310 m

En la figura 4.4 se muestra la secuencia básica de un procesado de datos de refracción sísmica y MASW la cual se puede ver de forma muy detallada en el anexo correspondiente.

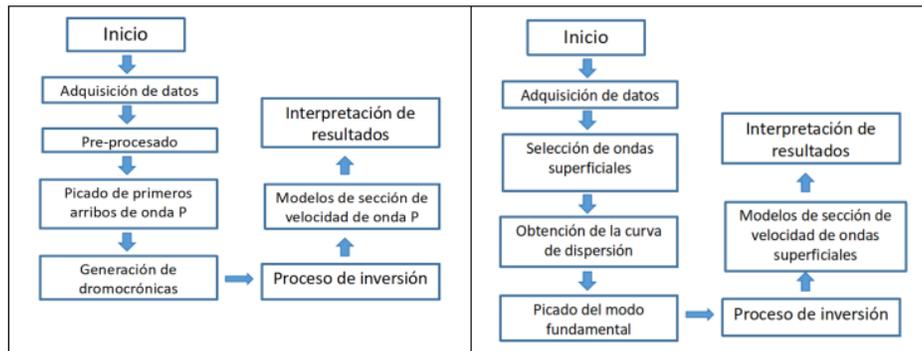


Figura 4.4: Flujos de trabajo para Refracción Sísmica y dispersión de ondas MASW

Para el PreProcesado, lo que se hace es visualizar y comprender la estructura de las líneas que se trabajaron para tener un mejor entendimiento de la manera en la que se manejan los datos; además, se buscaron usar diferentes formatos ya que al obtenerlos de la consola vienen con formato .sg2 el cual está cifrado; sin embargo, no se logró leer por lo que busqué otro formato y con .sgy conseguí un buen formato, sobre todo para el software libre para procesar.

Para el procesado se indican los primeros arribos de la onda P, es decir, la onda primaria cuya teoría ya fue revisada con detenimiento en la sección 1.2. Una vez que ya se tienen todos estos primeros arribos seleccionados de manera manual para todos los geófonos en cada una de las fuentes que fueron tomadas para cada una de las secciones, se guardan estos picados que van a estar ubicados en x,y y z. Dónde x es la ubicación en el geófono, en y tenemos la profundidad, en z es la velocidad de onda P.

El análisis de los primeros arribos constituye un paso fundamental en el procesamiento de datos sísmicos de refracción. Estos arribos, ya obtenidos y almacenados en archivos con una extensión específica, presentan un aspecto interesante que merece ser señalado: los programas de software libre y los comerciales suelen manejar diferentes formatos de archivo. Esto implica que un mismo picado de primeros arribos no siempre puede ser reutilizado directamente entre distintas plataformas, lo cual genera una limitación técnica y, al mismo tiempo, abre un área de oportunidad importante para el desarrollo de herramientas de conversión o estandarización de formatos dentro del flujo de procesamiento sísmico.

Una vez definidos y preparados los primeros arribos, la siguiente etapa consiste en introducir estos datos en el software de inversión, con el propósito de obtener el modelo de velocidades de ondas P. Dicho proceso se basa en la construcción de un modelo estratigráfico compuesto por capas horizontales, donde cada capa es representada con una velocidad sísmica constante. A partir de estos supuestos, el software ajusta un modelo matemático que explica las dromocronas observadas (curvas de tiempo de arribo en función de la distancia) mediante el método de mínimos cuadrados lineales.

De esta forma, se logra una aproximación inicial de la estructura del subsuelo, identificando contrastes de velocidad que suelen estar asociados a cambios litológicos o variaciones en las propiedades mecánicas de los materiales. En resumen, este procedimiento no solo constituye la base para la caracterización del subsuelo mediante refracción sísmica, sino que además pone de manifiesto la importancia de la calidad y el formato de los datos adquiridos, ya que de ellos depende la confiabilidad del modelo final obtenido.

Una vez concluido el proceso de inversión, los resultados se exportan en un archivo con formato .xlsx. Dicho

archivo requiere ser adaptado con ciertas características específicas, de modo que pueda ser interpretado correctamente por el programa desarrollado en el marco de esta tesis. Este formato estandarizado, que se detalla en el anexo correspondiente, asegura que los datos puedan ser procesados de manera uniforme y reproducible.

En lo que respecta a la generación de las gráficas, basta con realizar un ajuste a los encabezados del archivo y ubicar el documento en la misma carpeta donde se encuentra el código implementado. A partir de ello, el programa convierte automáticamente el archivo a formato .csv, el cual constituye la base para la exportación y el posterior análisis de datos.

Gracias a este procedimiento, se genera de manera automática el perfil de velocidades correspondiente a cada una de las líneas que cumplan con el formato establecido. La automatización de esta etapa no solo optimiza el flujo de trabajo, sino que también reduce errores manuales y facilita la interpretación gráfica de los resultados. Es por ello que la implementación de este código representa un avance significativo en la búsqueda de un proceso más eficiente y robusto para la visualización de los modelos de velocidad.

4.2 MASW

El procesamiento de ondas superficiales constituye la siguiente etapa en la metodología empleada. Para esta fase se utilizó exclusivamente software comercial, el cual ofrece como ventaja la posibilidad de trabajar directamente con archivos en formato .sg2, evitando así modificaciones iniciales complejas y facilitando el preprocesamiento de los datos.

En la etapa de procesado, la parte crítica corresponde a la definición de las curvas de dispersión. Este aspecto requiere especial atención, ya que un picado inadecuado por ejemplo, al seleccionar segmentos con frecuencias altas o zonas no representativas puede generar errores significativos en la inversión. Dichos errores ocurren porque el modelo se ajustaría a una región distinta de la que se busca caracterizar. Por esta razón, la calidad y precisión de la curva de dispersión se convierten en factores determinantes: cuanto mejor definida se encuentre, más confiables serán los resultados de la inversión.

En el mismo proceso de inversión es necesario establecer un modelo inicial, el cual se construye con base en la información obtenida en los estudios previos. Dicho modelo incluye parámetros como la velocidad de onda P, el número de capas considerado, la profundidad de cada una y el módulo de Poisson, todos ellos fundamentales para garantizar un ajuste realista de los resultados. Finalmente, una vez ejecutada la inversión, se sigue un procedimiento similar al descrito para refracción sísmica: los resultados se exportan en un archivo con extensión .xlsx. Este archivo contiene múltiples parámetros, aunque lo más relevante para el análisis son las columnas correspondientes a la velocidad de onda de corte (V_s) y a la profundidad (Z). Posteriormente, estos valores se trasladan a un nuevo archivo que incorpora una columna adicional con la ubicación en el eje X. Esta etapa lleva a la construcción de perfiles de ondas superficiales que representan la variación de las propiedades del subuselo.

Una vez generado el archivo correspondiente para cada línea, es necesario completar el mismo procedimiento para todas ellas, con el fin de aprovechar el programa desarrollado en esta tesis denominado plot.py. Este código se encuentra disponible en línea para su uso y ha sido construido en el lenguaje de programación Python (Python Software Foundation, 2023) [41]. El programa está diseñado para ejecutarse de manera automática, siempre y cuando los archivos tengan el formato especificado en el anexo correspondiente. Su funcionamiento consiste en convertir los datos a formato .csv y, posteriormente, generar las gráficas de los perfiles de velocidad. Para lograr una representación adecuada, implementa una interpolación lineal, lo que permite obtener resultados consistentes y homogéneos a lo largo de todas las líneas procesadas. Eso es tanto la refracción sísmica como para el perfil de ondas superficiales y en caso de necesitar información más



Figura 4.5: Fotografía representativa en la adquisición de datos de tomografía eléctrica

específica se puede consultar el anexo.

4.3 Exploración Eléctrica

El equipo que se empleó para el estudio de tomografía eléctrica consiste en un resistivímetro Syscal Pro de la marca Iris Instruments de 48 canales; 48 electrodos de acero inoxidable de 40 cm conectados a cables inteligentes y espaciados de manera equidistante a 5 m. La configuración del arreglo fue Dipolo-Dipolo. Se realizaron 12 tendidos de resistividad eléctrica cuyas características se enuncian en 4.2

En la figura 4.5 se muestra como es que se coloca un levantamiento de exploración eléctrica donde es importante acordonar la zona para indicar que no se puede pasar por allí y con ello evitar algún percance en la operación.

Código de ensayo	Longitud Realizada (m)	Ubicación	Nivel
TE-101	155	TSF-01	Terreno
TE-102	155	TSF-01	15 m
TE-103	155	TSF-01	Terreno
TE-104	155	TSF-01	Terreno
TE-105	155	TSF-01	Terreno
TE-106	155	TSF-01	25 m
TE-107	155	TSF-01	25 m
TE-108	155	TSF-01	25 m
TE-109	155	TSF-01	25 m
TE-110	155	TSF-01	25 m
TE-111	155	TSF-01	25 m
TE-112	155	TSF-01	25 m

Tabla 4.2: Resumen de trabajos de tomografía eléctrica realizados en TSF-01.

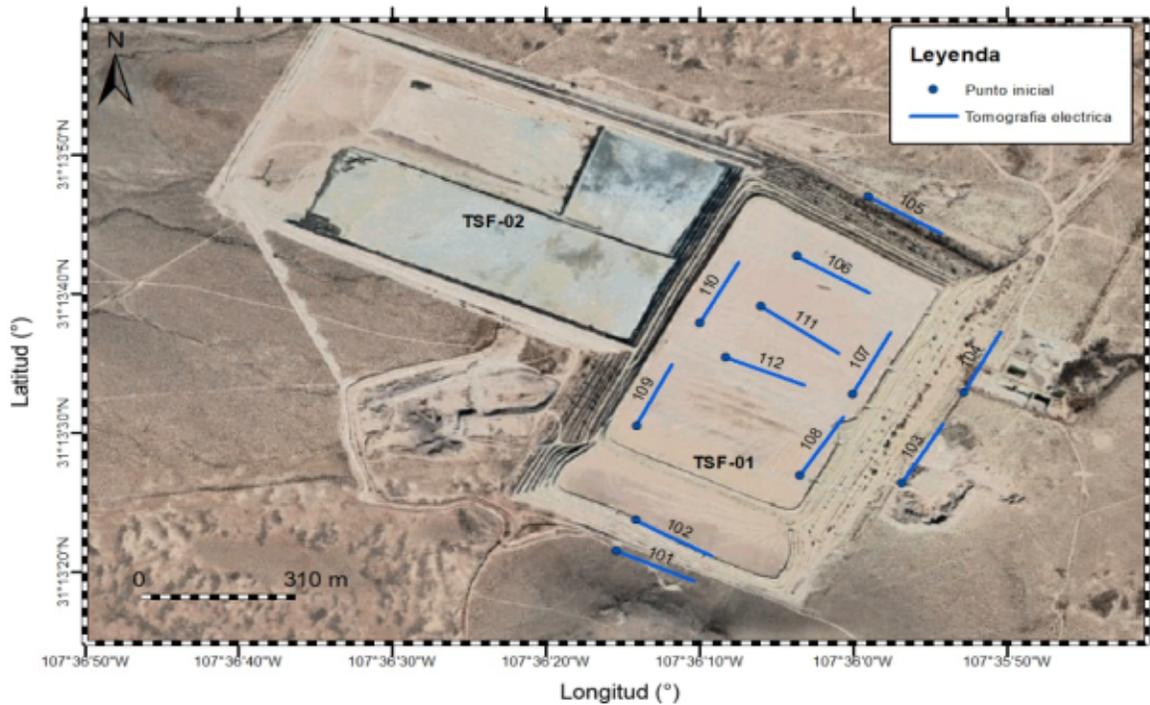


Figura 4.6: Croquis en planta de la campaña de exploración eléctrica en la zona de estudio. Los puntos azules indican el inicio de la línea. Escala 1:310 m

Una vez revisadas las especificaciones técnicas del equipo utilizado, así como los fundamentos teóricos del método y los algoritmos de inversión aplicados para la obtención de los modelos, se procede a la presentación de los valores graficados que se expondrán en la siguiente sección correspondiente a los resultados.

En la figura 4.7 se muestra la secuencia básica de un procesado de datos para tomografía eléctrica la cual se puede ver de forma detallada en el anexo.

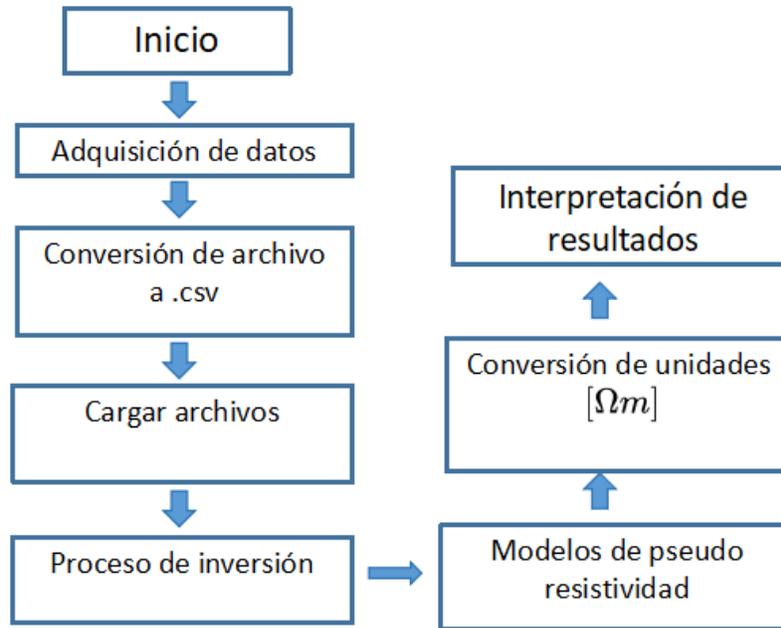


Figura 4.7: Metodología para TRE

El preprocesamiento de la prospección eléctrica inicia con la conversión de los archivos obtenidos en formato .bin hacia el formato .csv, el cual es requerido para que el software libre de procesamiento pueda ejecutarse de manera adecuada. Este cambio de formato se realiza actualmente mediante un software externo, aunque resulta importante señalar que, como trabajo futuro, podría desarrollarse un código propio que automatice esta conversión y optimice el flujo de trabajo.

En lo que respecta al procesamiento de los datos de resistividad eléctrica en software libre, la interfaz resulta bastante intuitiva: únicamente es necesario identificar correctamente el tipo de datos adquiridos y especificar el equipo utilizado en la adquisición. El programa implementa un algoritmo de inversión por mínimos cuadrados, lo que permite ajustar un modelo de resistividad del subsuelo a partir de las mediciones registradas.

Para una descripción más detallada del procedimiento, se remite al anexo correspondiente, donde se documenta de manera específica cómo se realiza este procesamiento. Cabe destacar que, más allá de las rutinas automáticas del software, el factor crítico en este tipo de estudios es el diseño adecuado de la secuencia de adquisición, ya que de ello depende en gran medida la calidad y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

5 Análisis y discusión de resultados

5.0.1 Refracción sísmica

La norma (ASTM D5777, 2019) [73] se enfoca en guiar el empleo del método de Refracción Sísmica; resume el tipo de equipo, procedimiento de campo y métodos de interpretación. La velocidad de propagación V_p está relacionada con las propiedades mecánicas del material que conforma el suelo. Para el caso del análisis e interpretación de los resultados de velocidad de ondas de compresión V_p obtenidos con el ensayo de refracción sísmica, se consideran los rangos de velocidad de la siguiente tabla 5.1 *Clasificación de perfiles del suelo*.

Material	Velocidad [m/s]
Material superficial meteorizado	240-610
Grava o arena seca	460-915
Arena (Saturada)	1220-1830
Arcilla (Saturada)	915 - 2750
Agua	1430 - 1830
Agua de mar	1460 - 1525
Arenisca	1830 - 3960
Lutita	2750 - 4720
Yeso	1830 - 3960
Caliza	2134 - 6100
Granito	4575 - 5800
Roca metamórfica	3050 - 7000
Rocas andesíticos y basaltos	3000 - 6000

Tabla 5.1: Clasificación de perfiles del suelo de acuerdo a la norma ASTM D5777 [73]

En general, los rayos sísmicos calculados para las tomografías de refracción sísmica tuvieron una media de 26[m] de profundidad. A partir de ello, para todas las secciones se reporta esta cantidad de información confiable. Las unidades sísmicas se han separado con base en la norma ASTM D5777, y además se ha correlacionado con la información obtenida en la campaña de exploración.

Para ser más claro, es importante considerar dónde es que se realiza cada medición. En el caso de las líneas 101,104,105 y 106 que están delimitando la estructura y se encuentran sobre suelo firme. Indican un incremento progresivo en los espesores de las unidades U1 y U2 conforme se avanza en dirección sur-norte. Debajo de dichas unidades, se identifica una capa con velocidades sísmicas superiores a los 1800 m/s.

Como parte de los objetivos se planteó comparar los resultados obtenidos en el estudio de refracción sísmica para software libre y comercial es por ello que en esta sección se van a revisar con detenimiento. Las figuras que se presentan muestran del lado izquierdo los resultados calculados con software comercial mientras que del lado derecho se tienen los resultados con software libre.

Para las secciones 101,104,105 y 106, hay tres unidades, la primera tiene un rango de velocidad de 100 a 800 $\frac{m}{s}$ con un espesor de hasta 5[m] de profundidad que corresponde a suelos poco consolidados. Arenas limosas.

La segunda unidad es de espesor variable, pero se presenta desde los 3 hasta los 24[m], estos se distribuyen a lo largo de todas las líneas. Tiene un rango de velocidades V_p entre 800 y 1300 $\frac{m}{s}$ es considerado suelo consolidado medianamente. Está relacionado con depósitos de aluvi3n, puede presentar matriz con limos y arcillas o intercalaciones con otros materiales como fragmentos de basalto o andesita.

La tercera unidad llamado así por no haberse identificado la base de a capa sísmica presenta velocidades mayores a 1700 $\frac{m}{s}$, incrementando en profundidad. Se considera como un suelo consolidado o bien una roca dura. La profundidad a la que se encuentra es variable conforme la distancia, aumentando en profundidad hacia el norte. Un ejemplo claro es en la sección 106 donde apenas es distinguible.

Los resultados se presentan en la figura 5.1 se puede notar que existen resultados parecidos; sin embargo el software comercial presenta un nivel de detalle mayor respecto al software libre pese a que las dromocrónicas son muy parecidas entre ellas, esto para los resultados en terreno natural.

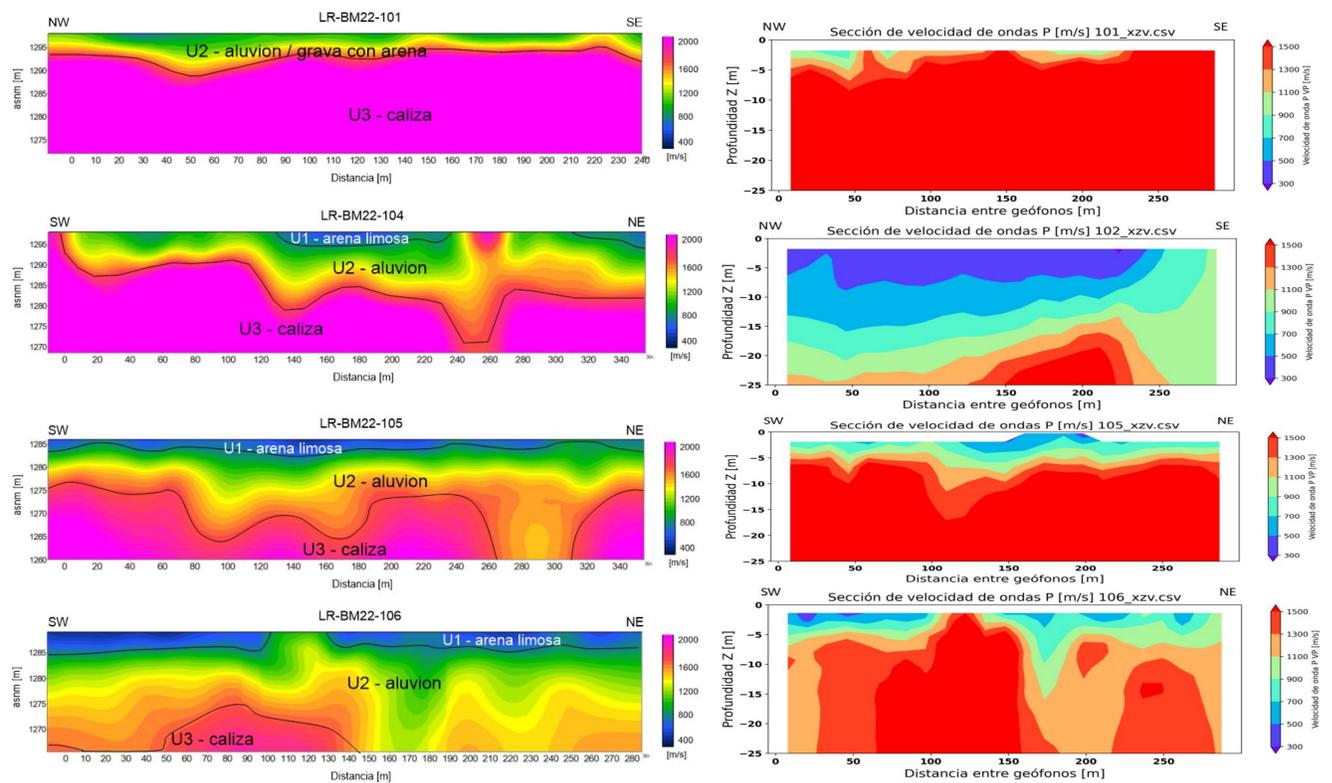


Figura 5.1: Comparaci3n de perfiles sísmicos de velocidad de onda P (m/s) en TSF-01 de las líneas 101, 104, 105 y 106 en terreno natural y firme. Software libre (izquierda), software comercial (derecha).

Para el caso de las secciones 115 y 116 se evidencia que en direcci3n de sur a norte existe un aumento gradual de los espesores para las unidades U1 y U2. Incluso, la U3 desaparece en 116, indicando que el espesor de U2 es incierto con refracci3n.

Se presentan 3 unidades, la unidad sísmica 1 (U1) la cual cuenta con rango de velocidad V_p entre 100 a 800 $\frac{m}{s}$, presenta un espesor que varía hasta los 16 metros y corresponde a suelos poco consolidados, incrementándose la rigidez en profundidad. A esta unidad corresponden suelos clasificados como arenas limosas.

La unidad sísmica 2 (U2). Esta unidad de espesor variable entre 2 a 26 metros, siendo los mayores distribuidos en todas las líneas. Con rango de velocidad V_p entre 800 a 1800 $\frac{m}{s}$, esta capa está caracterizada como suelo medianamente consolidado. A esta unidad se relaciona con depósitos de aluvión, que pueden presentar una matriz de arena con limos y arcillas, o intercalaciones con otro tipo de materiales, como fragmentos de basaltos o de andesitas (piroclastos).

La tercera unidad que se llama Semi-espacio (U3) por no haberse identificado la base de la capa sísmica presenta velocidades mayores a 1800 $\frac{m}{s}$, incrementando en profundidad. Se considera como un suelo consolidado o bien una roca dura. La profundidad a la que se encuentra es variable conforme la distancia, aumentando en profundidad hacia el norte. Un ejemplo claro es la sección 116 donde apenas es distinguible.

En la figura 5.2 los patrones de comportamiento son muy parecidos, pero se vuelve a ver que para el software comercial existe una exageración en la representación de los resultados. Siendo que lo importante es identificar las unidades lo puede hacer más complicado en la interpretación.

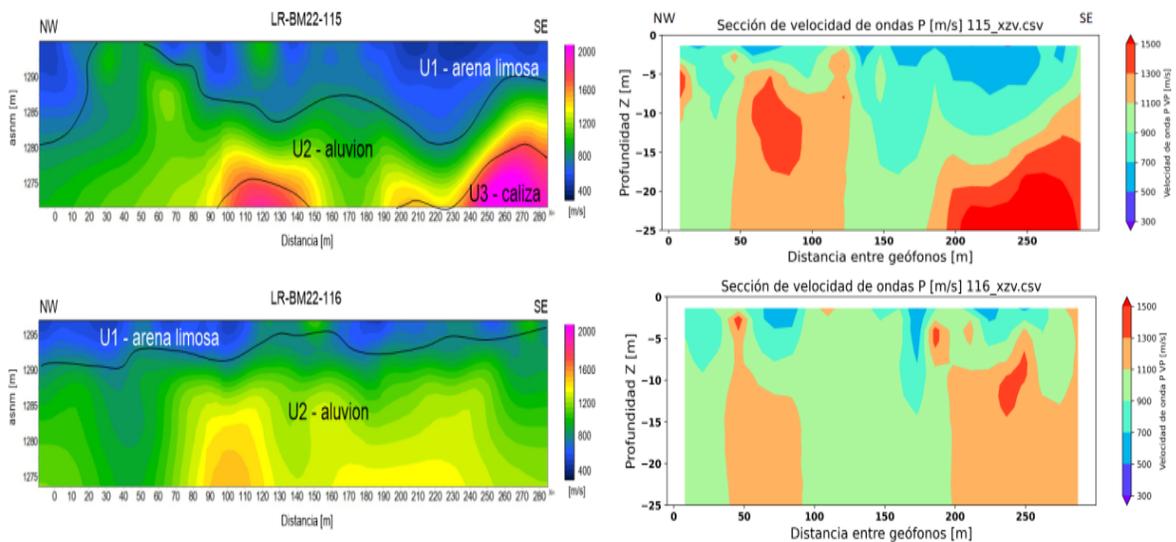


Figura 5.2: Comparación de perfiles sísmicos de velocidad onda P (m/s) en TSF-02 de las líneas 115 y 116, sobre terreno natural. Software libre (izquierda), software comercial (derecha)

El siguiente análisis de resultados se hará un enfoque a las condiciones de la presa de jales. Para las unidades 102 y 103, se ilustra que existe una unidad sísmica (U1) que refiere a materiales pertenecientes a jales por estar sobre un desnivel de la presa. Debajo de esta unidad se destacan dos unidades más, que están relacionadas con las mismas unidades observadas en las secciones sobre terreno natural, para los perfiles de velocidad sobre la terraza de la presa de jales mineros. En la figura 5.3 los patrones de comportamiento son muy parecidos, pero se vuelve a ver que para el software comercial existe una exageración en la representación de los resultados. Siendo que lo importante es identificar las unidades lo puede hacer más complicado en la interpretación.

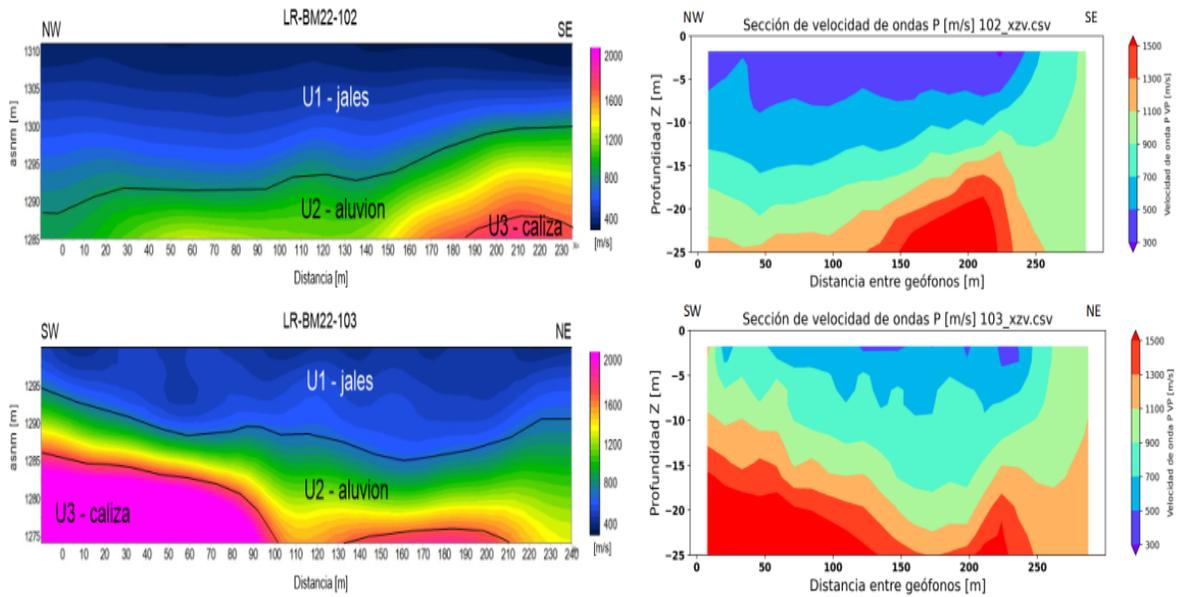


Figura 5.3: Comparación de perfiles Sísmicos de velocidad onda P (m/s) en TSF-01 de las líneas 102 y 103, sobre terraza de presa de jales. Software libre (izquierda), software comercial (derecha)

A partir de ahora vamos a la parte como tal de la presa de jales. Desde la línea 107 a 114 ubicada hacia la parte superior del depósito de jales, se identifican únicamente dos unidades sísmicas principales. Una excepción a este patrón se presenta en los registros 112 y 113, donde la unidad somera muestra una subdivisión interna. En la tabla 5.2 *Unidades identificadas para las secciones 107 a 109* La unidad somera, correspondiente a los jales, está compuesta por una arena limosa. Esta unidad se encuentra sobrepuesta a depósitos aluviales, integrados por gravas, fragmentos de escoria volcánica o arenas medias a gruesas acompañadas de gravas de alta compacidad, los cuales conforman la unidad más profunda (aluvión).

Unidad sísmica	Espesor [m] de sección 107	Espesor [m] de sección 108	Espesor [m] de sección 109	Velocidad [m/s]	Material
1	25 [m]	4-26 [m]	2-20 [m]	300-800	Jales
2				800-1800	Aluvión
3	No detectado	No detectado	No detectado	>1800	Caliza

Tabla 5.2: Unidades identificadas para las secciones 107 a 109

En la figura 5.4 la cual corresponde a los perfiles dentro del vaso se pueden ver las limitantes que tiene el software libre se ve rebasado en términos de sensibilidad a los pequeños cambios discriminando esas pequeñas capas las cuales con software comercial se logran ver muy claras.

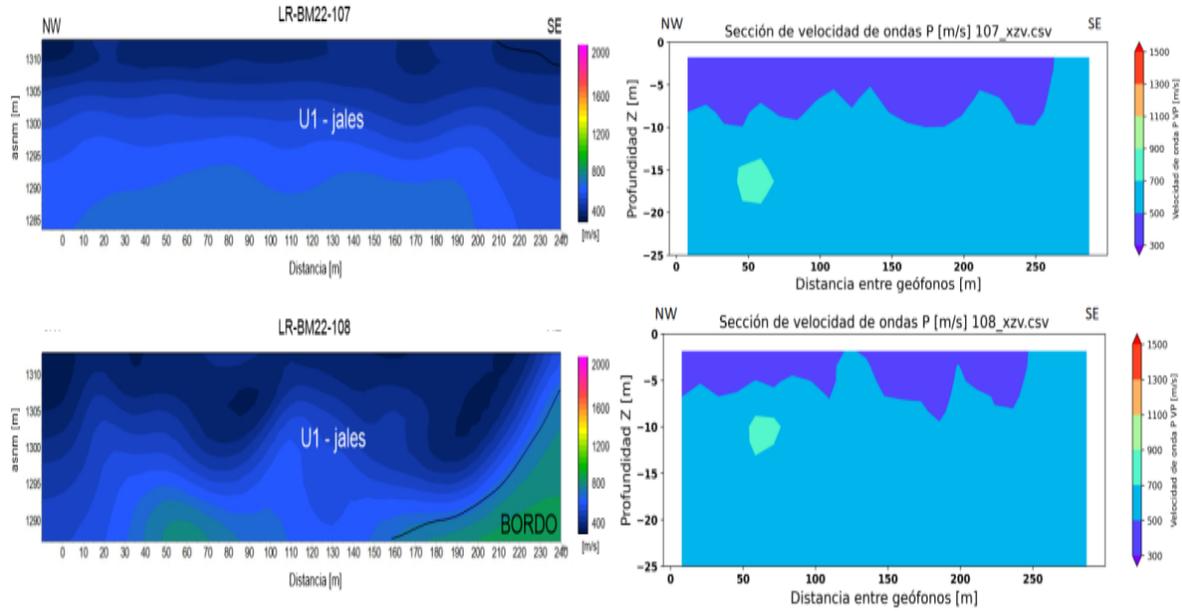


Figura 5.4: Comparación de perfiles sísmicos de velocidad onda P (m/s) en TSF-01 de las líneas 107 y 108, dentro del vaso de los depósitos de jales. Software libre (izquierda), software comercial (derecha)

En la tabla 5.3 *Unidades identificadas para secciones 110 a 114* se muestran las unidades identificadas para las secciones 110 a 114 donde destaca una capa de espesor 19 [m] a 26[m], velocidad de 100 a 800 $\frac{m}{s}$ que corresponde a material de jales, no se presenta una segunda capa.

Unidad sísmica	Espesor [m] de sección 110	Espesor [m] de sección 111	Espesor [m] de sección 114	Velocidad [m/s]	Material
1	19 -25 [m]	18-24 [m]	14-26 [m]	300-800	Jales
2				800-1800	Aluvión
3	No detectado	No detectado	No detectado	>1800	Caliza

Tabla 5.3: Unidades identificadas para las secciones 110 a 114

A continuación solo se mostrarán las imágenes que muestran los resultados dentro del vaso de los depósitos de jales figura 5.5 y figura 5.6

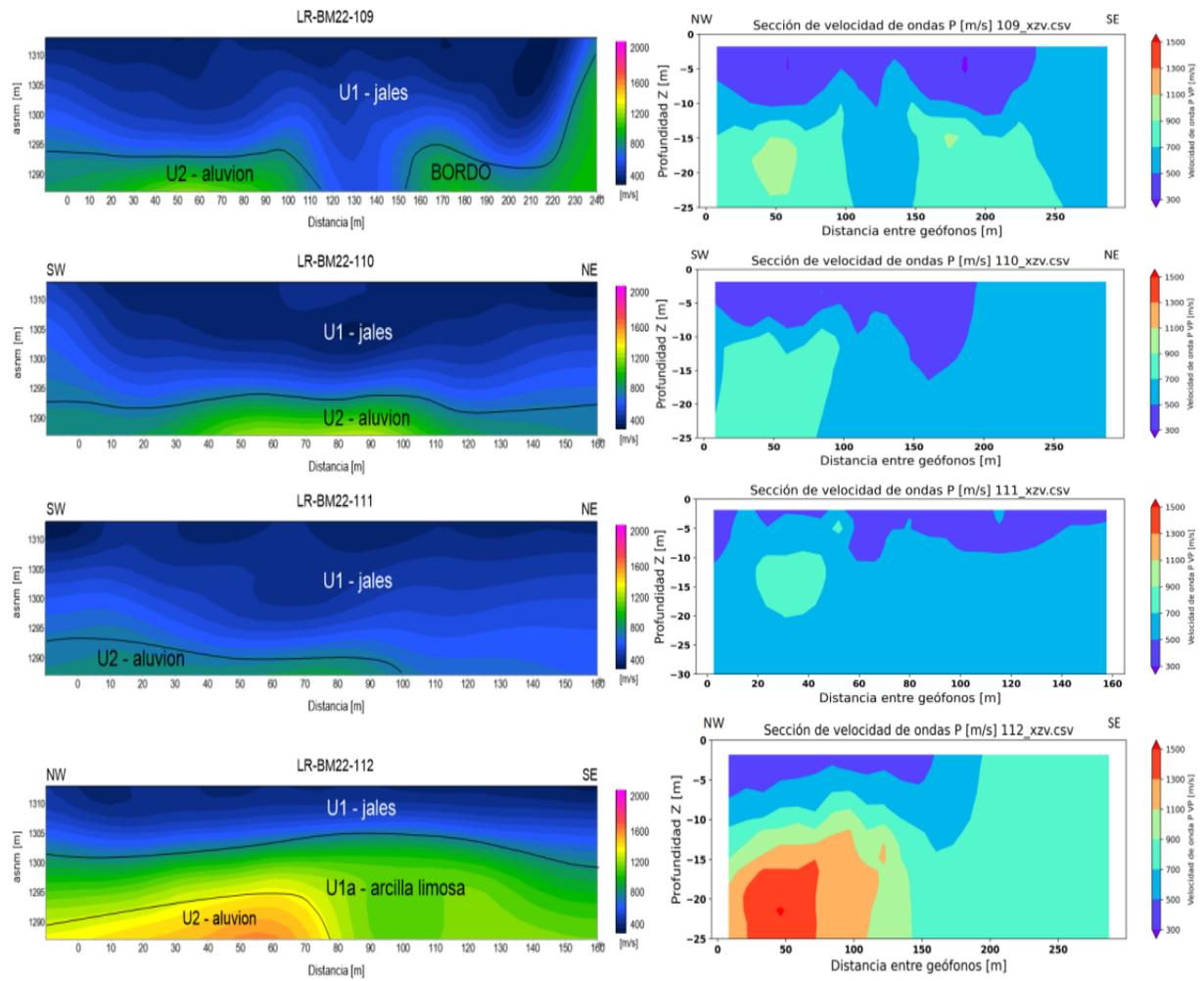


Figura 5.5: Comparación de perfiles sísmicos de velocidad onda P (m/s) en TSF-01 de las líneas 109 a 112, dentro del vaso de los depósitos de jales. Software libre (izquierda), software comercial (derecha)

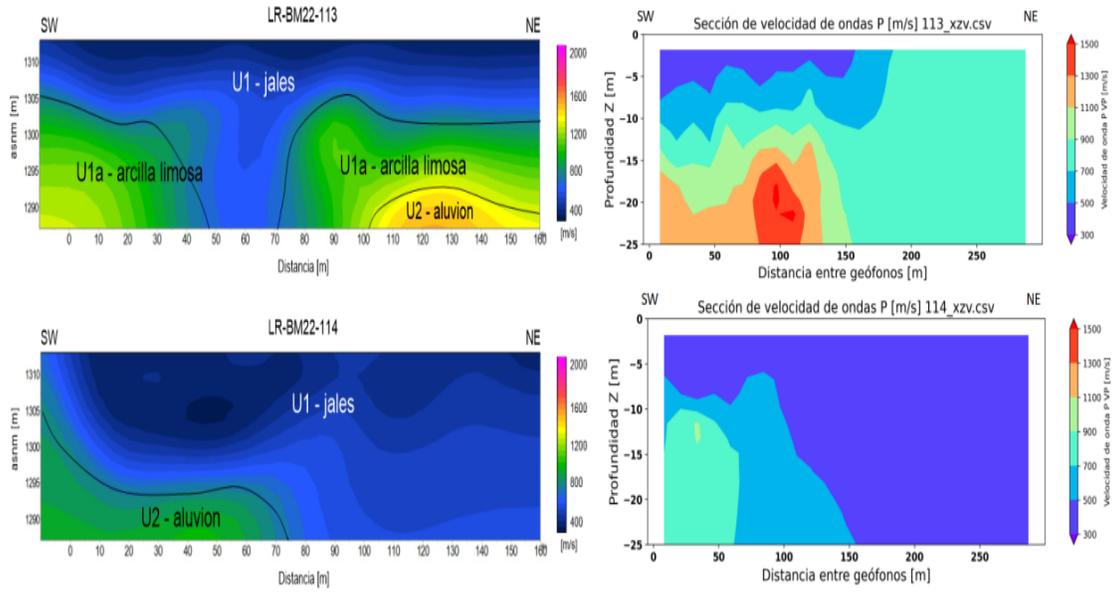


Figura 5.6: Comparación de perfiles sísmicos de velocidad onda P (m/s) en TSF-01 de las líneas 113 y 114, dentro del vaso de los depósitos de jales. Software libre (izquierda), software comercial (derecha)

5.0.2 MASW

NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction) por sus siglas en inglés [42] proporciona una tabla de velocidades de onda S, como se puede ver a continuación:

Tipo de sitio	V_s	N ó N_{ch}	S_u
Roca Dura (A)	$< 1500(m/s)$	N/A	N/A
Roca (B)	$760 - 1500(m/s)$	N/A	N/A
Suelo muy denso y roca suave (C)	$370 - 760(m/s)$	> 50	$> 100[kPa]$
Suelo rígido (D)	$180 - 370(m/s)$	$15 - 50$	$50 - 100[kPa]$
Suelo (E)	$< 180(m/s)$	< 15	$< 50[kPa]$

Tabla 5.4: NEHRP Tipos de suelo basados en la velocidad de ondas superficiales de los primeros 30 metros

La velocidad de propagación de ondas para los primeros 30 metros (V_S) se determina con la siguiente fórmula:

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{V_{S_i}}\right)}$$

Donde:

d_i es el espesor de la capa [m] y V_{S_i} velocidad de onda de corte en la capa anterior [$\frac{m}{s}$]

Las figuras 5.7, 5.8 y 5.9 muestran que el aumento en velocidad es gradual y mantiene una distribución homogénea en profundidad, sin variaciones bruscas que indiquen transiciones significativas entre materiales. Esta consistencia sugiere que el subsuelo en la zona analizada presenta una estructura relativamente uniforme,

con ligeros incrementos de rigidez en niveles más profundos, lo cual refuerza la estabilidad del modelo obtenido y la confiabilidad del procesamiento realizado.

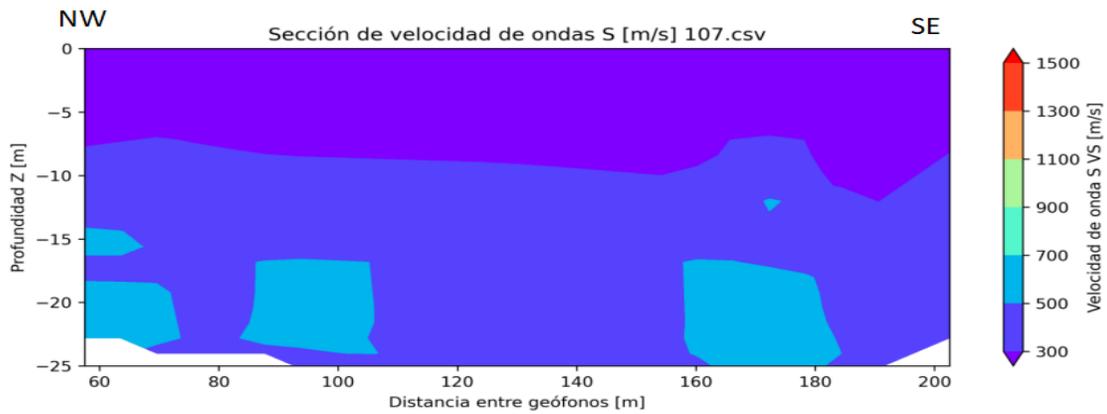


Figura 5.7: Perfiles de velocidad de ondas S para la sección 107

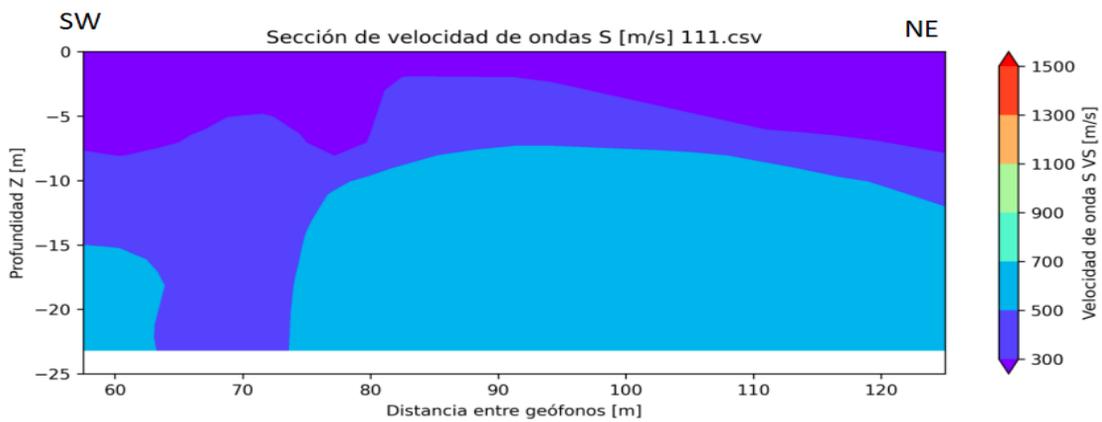
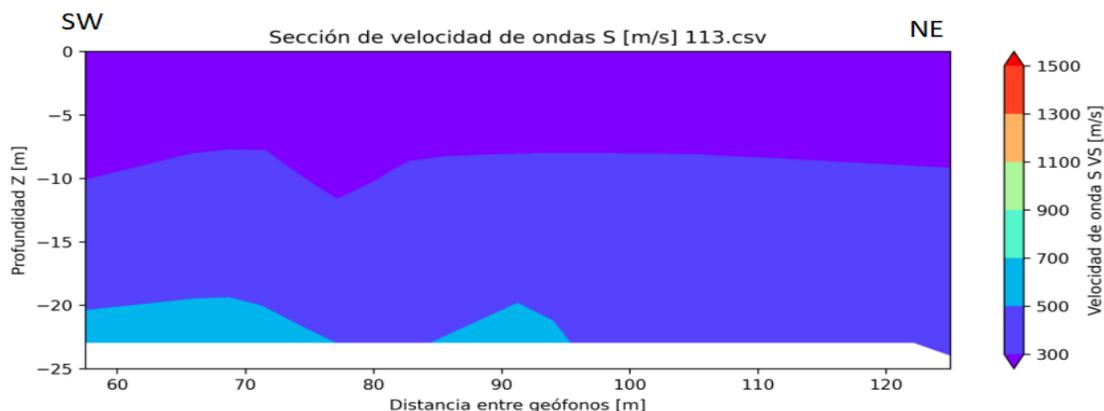


Figura 5.8: Perfiles de velocidad de ondas S para la sección 111



(a) Sección 113

Figura 5.9: Perfiles de velocidad de ondas S para la sección 113

A partir de todos los valores que fueron calculados con MASW para la parte superior de la presa se obtiene un perfil de velocidades promedio que se presenta en 5.8 *Modelo sismoestratigráfico propuesto para la presa de jales*, los valores que se usaron son las que están mostrados en la tabla 5.5 *Tablas de valores promedio de perfiles de velocidad en la superficie de la presa*.

Prof. (m)	MASW 07	Prof. (m)	MASW 08	Prof. (m)	MASW 09	Prof. (m)	MASW 10
0.0	210	0.0	217	0.0	209	0.0	211
2.9	244	3.3	254	3.7	257	4	277
10.0	300	11.3	296	10.6	292	10.7	254
16.1	251	15.6	326	16.9	324	17.2	335
23.5	287	23.4	344	23.4	385	22.6	424
30.1	341	30.5	361	30.3	421	30.3	462
38.3	368	38.6	367	38.5	431	38.6	471

Prof. (m)	MASW 11	Prof. (m)	MASW 12	Prof. (m)	MASW 13	Prof. (m)	MASW 14
0.0	201	0.0	193	0.0	204	0.0	194
2.6	251	3.9	242	4.3	257	4.1	265
10.7	327	10.1	217	10.9	252	11.3	267
16.3	286	15.1	306	17	350	18.9	391
23.9	325	23.3	317	21.4	403	21.3	545
30.1	396	34.6	476	31.3	405	29.6	541
38.2	433	40.6	862	42.4	527	38.6	477

Tabla 5.5: Tablas de valores promedio de perfiles de velocidad en la superficie de la presa.

El perfil de velocidades promedio que se muestra en la figura 5.10, representado por la línea roja y mostrado a detalle en la tabla 5.8, refleja una tendencia estable y coherente con la distribución de velocidades obtenidas en los distintos modelos individuales. Se observa un incremento gradual de la velocidad conforme aumenta la profundidad, lo que sugiere una compactación progresiva. La similitud entre los perfiles individuales y el

promedio indica una buena consistencia entre los datos, lo que refuerza la confiabilidad del modelo sísmico generado.

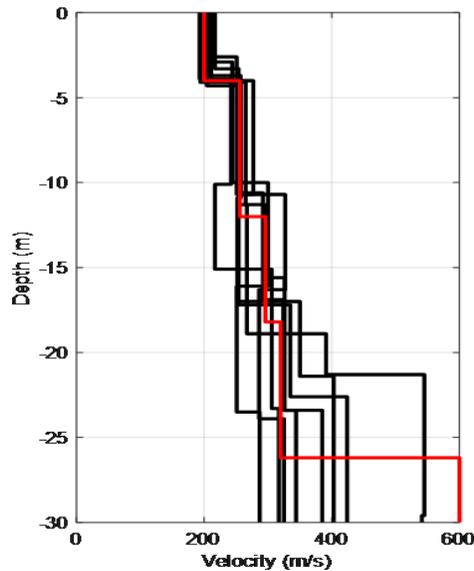


Figura 5.10: Perfiles de velocidad 2D. El perfil representado con una línea roja corresponde al modelo promedio.

5.0.3 Eléctrica

Para la interpretación de los resultados de resistividad eléctrica es necesario poder clasificar y asociar las resistividades reales obtenidas producto de la inversión. Existen diversas tablas que clasifican la resistividad en las rocas y el suelo. Para el caso de las rocas se hace uso de las tablas de resistividades que plantea Loke(2010)[43] y Palaky (1987) [44] que se muestran en la Figuras 5.11,5.12. Cabe mencionar que hasta hoy no existe una norma que regule los procedimientos para los trabajos de Tomografía eléctrica, así como para la interpretación de esta prueba.

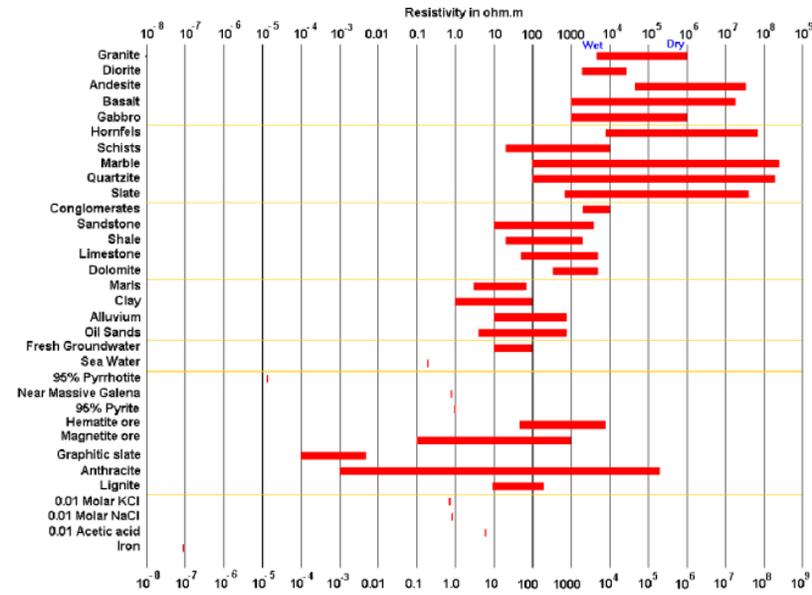


Figura 5.11: Resistividad de rocas, suelos y minerales (Loke, 2010)[74]

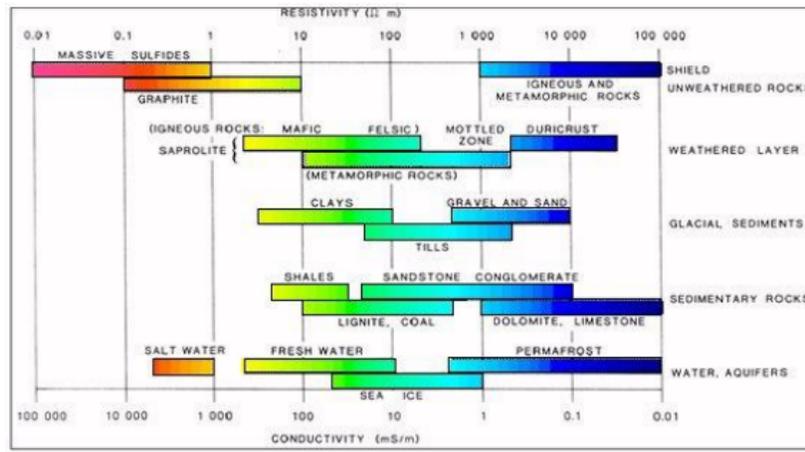
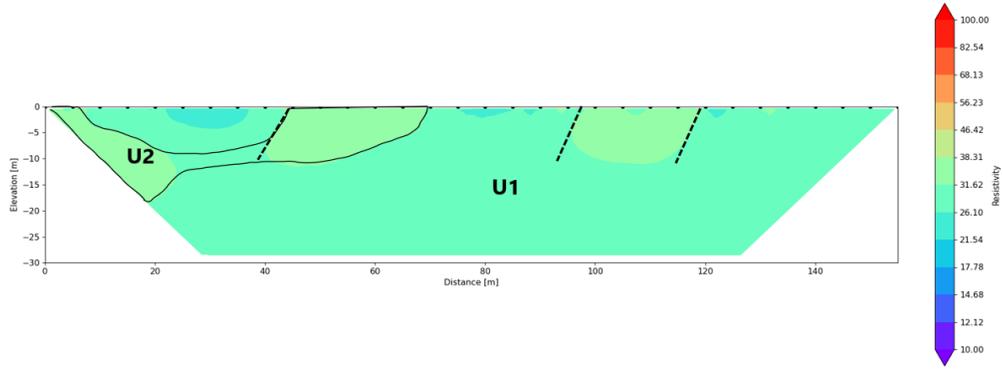
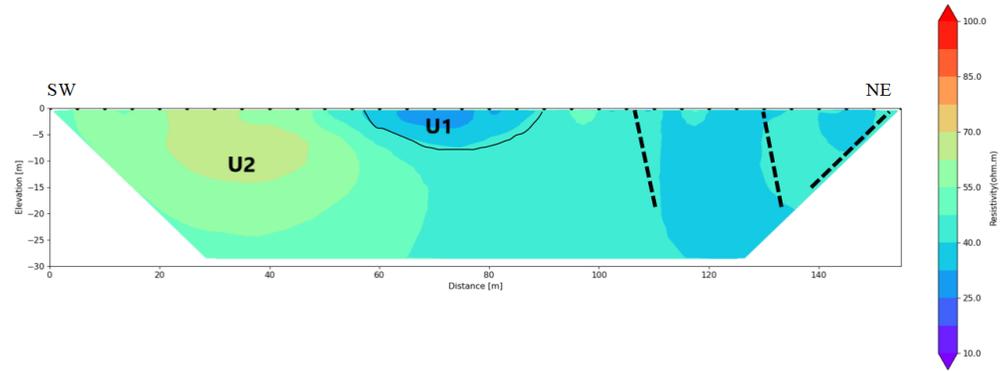


Figura 5.12: Resistividad de rocas, suelos y minerales (Palaky, 1987)[75]

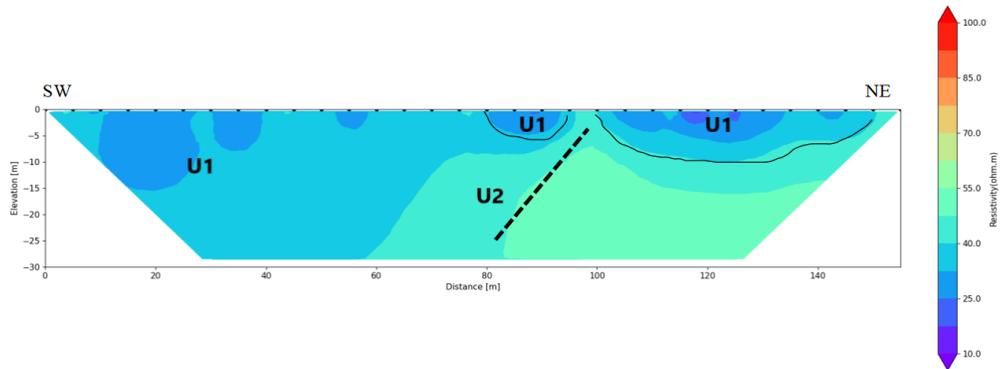
A continuación en las figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se presentan los perfiles bidimensionales de resistividad eléctrica. Sobre estas imágenes se han interpretado las diferentes unidades eléctricas identificadas, así como las discontinuidades marcadas con líneas punteadas en color negro las cuales se interpretan a partir de como se delimitan zonas donde la resistividad cambia abruptamente, lo cual puede representar contactos entre materiales con diferentes condiciones, estas pueden ser de compactación, fracturas o planos estructurales. La distribución de las unidades U1 y U2, así como la geometría de las discontinuidades, permiten dar un indicio sobre la presencia de zonas de heterogeneidad en la presa de jales y diferencias en la saturación del material.



(a) Sección 106

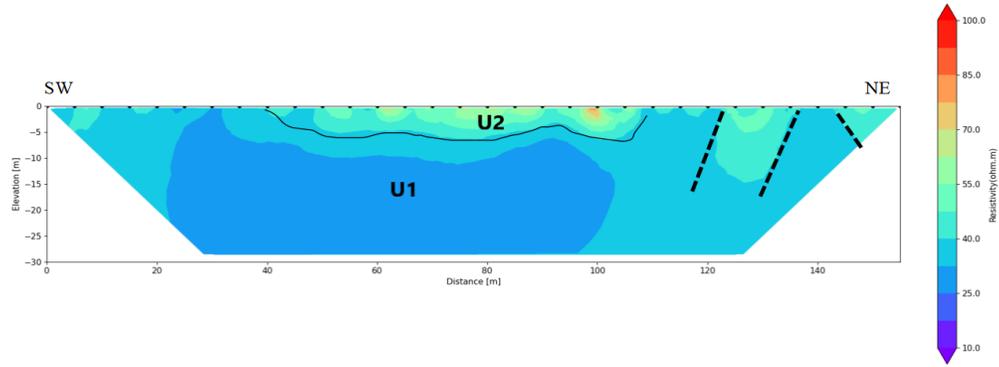


(b) Sección 107

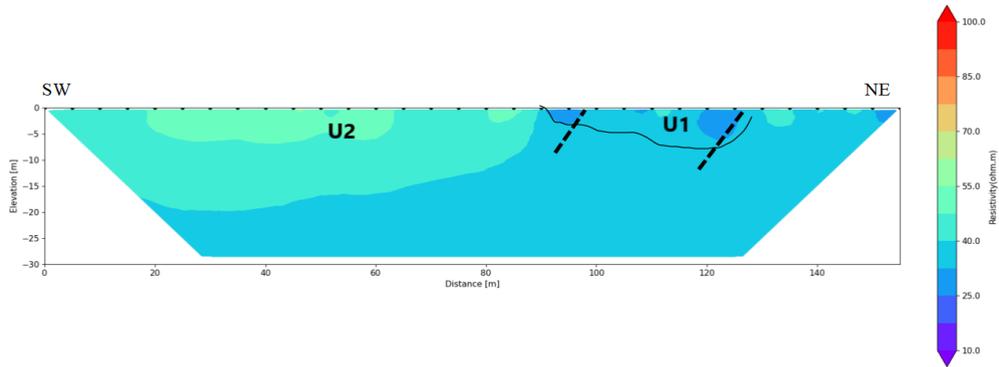


(c) Sección 108

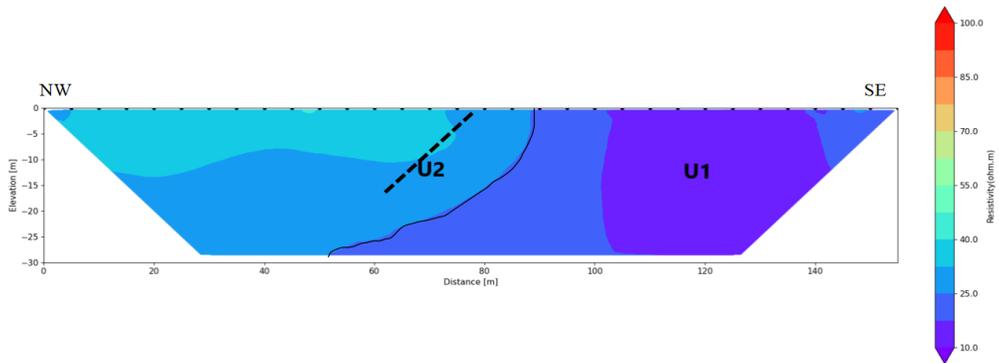
Figura 5.13: Resultado de Tomografía Eléctrica para la parte superior de la presa de jales



(a) Sección 109

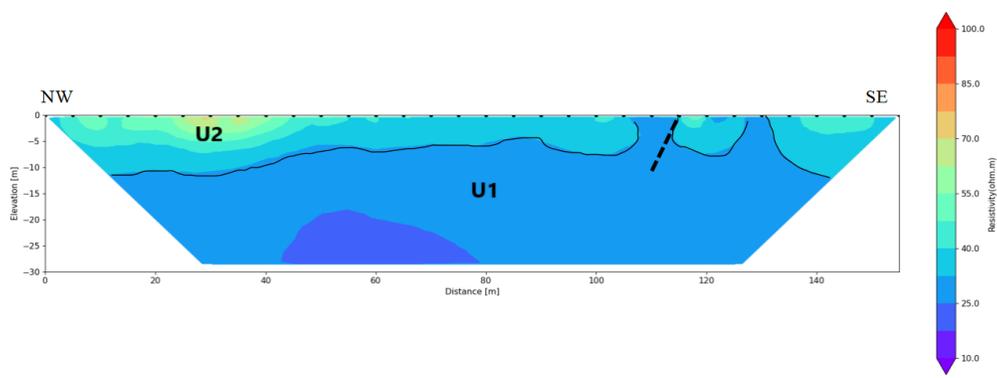


(b) Sección 110



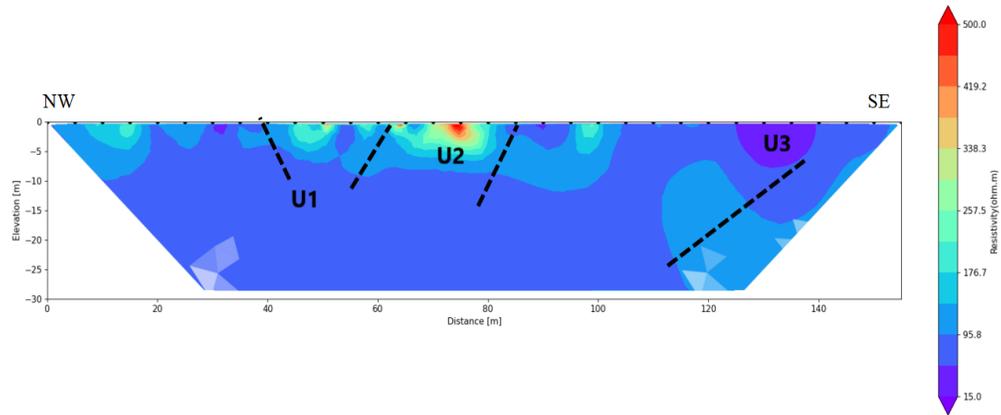
(c) Sección 111

Figura 5.14: Resultado de Tomografía Eléctrica para la parte superior de la presa de jales

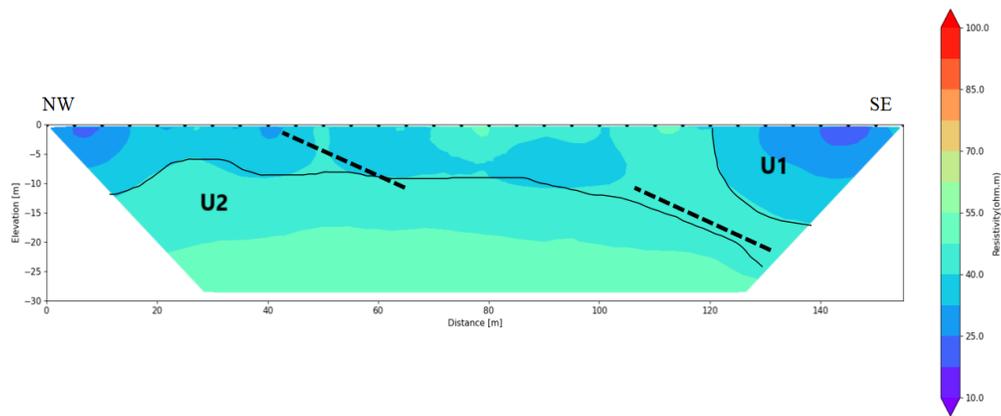


(a) Sección 112

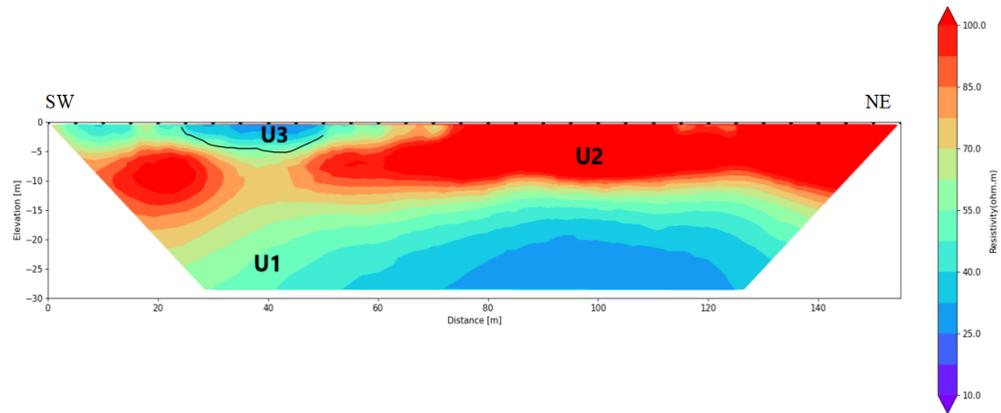
Figura 5.15: Resultado de Tomografía Eléctrica para la parte superior de la presa de jales



(a) Sección 101

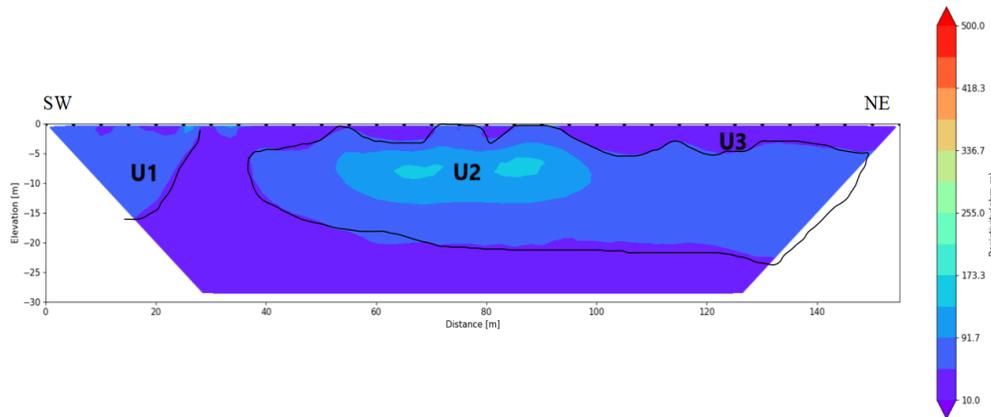


(b) Sección 102

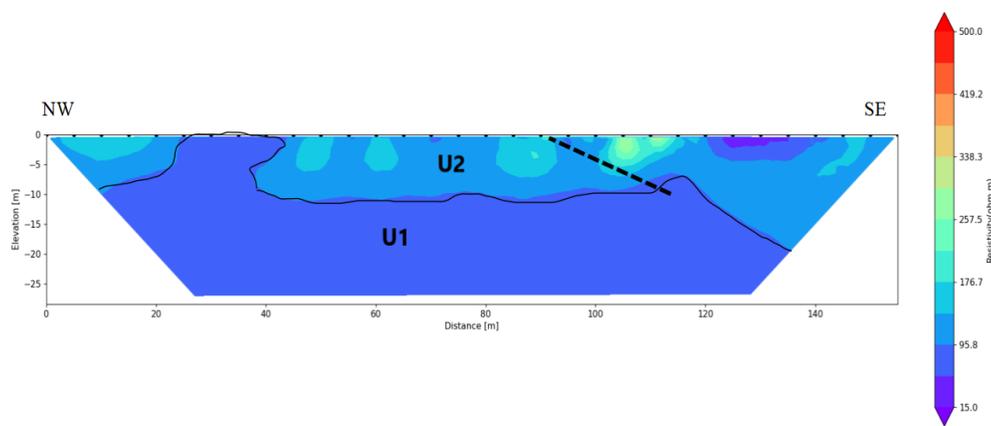


(c) Sección 103

Figura 5.16: Resultado de Tomografía Eléctrica para la parte inferior de la presa de jales mineros



(a) Sección 104



(b) Sección 105 DD

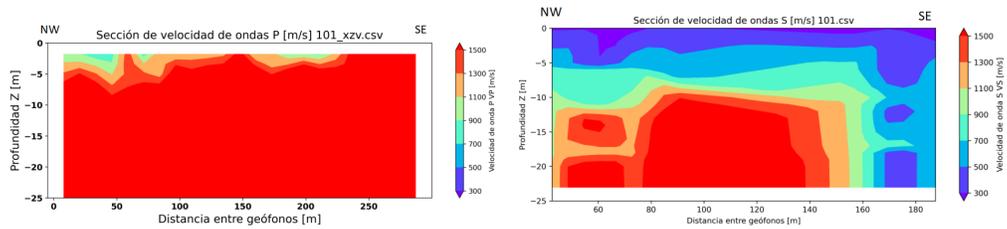
Figura 5.17: Resultado de Tomografía Eléctrica para la parte inferior de la presa de jales mineros

En las secciones 101 a 103 5.16 se reconocen zonas conductivas destacadas, con resistividades bajas de $10\text{--}25 \Omega \cdot m$ entre 2 y 6 m de profundidad. Estas corresponden a materiales finos o saturados en el pie de la presa, lo que refleja condiciones menos competentes. En contraste, las secciones 104 y 105 muestran un predominio de bloques más resistentes, con valores superiores a $90 \Omega \cdot m$, lo cual se asocia a aluvión más compacto.

La comparación entre esta parte inferior evidencia un cambio lateral: mientras en las secciones 101 a 103 5.16 predominan unidades blandas y conductivas, para las secciones 104 y 105 5.17 se presentan materiales más secos y resistentes.

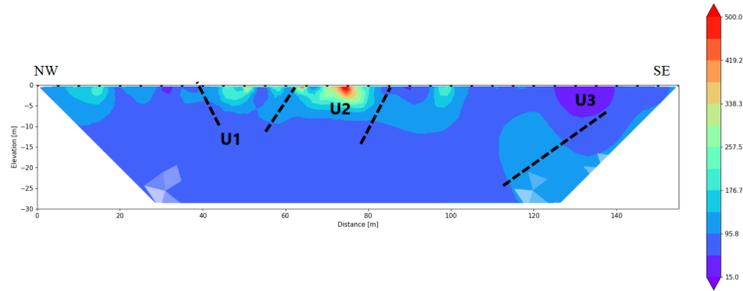
Secciones 101-106 (borde y transición a natural).

L101: Refracción y MASW sugieren una estructura/falla NE-SW en 90–110 m; en TRE no se observa el mismo trazo, por lo que se considera indicio sísmico que requiere verificación adicional



(a) Refracción L101

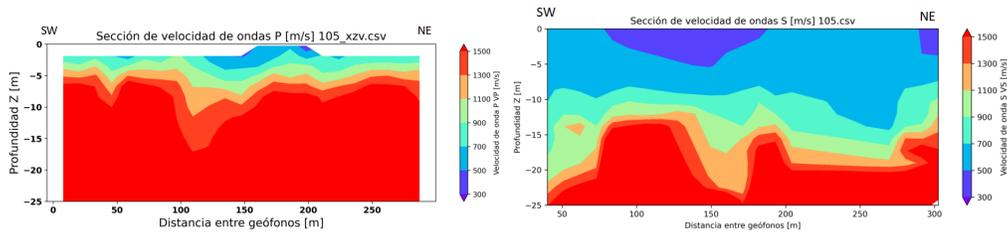
(b) MASW L101



(c) TRE L101

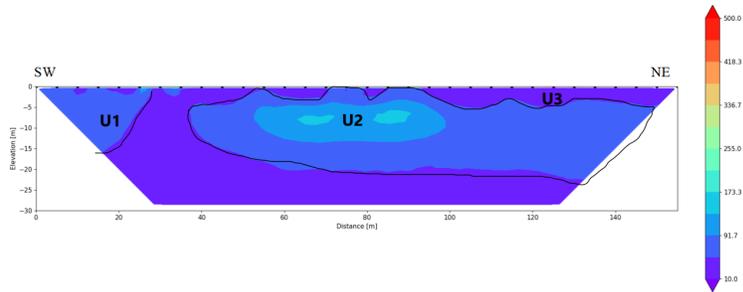
Figura 5.18: Comparativa L101 (sísmica) vs TRE L101.

L105: Sísmica muestra estructura en 100–150 m; TRE (L104) presenta otra anomalía en 20–40 m que no se manifiesta en sísmica (**discrepancia local**; Fig. 5.19).



(a) Refracción L105

(b) MASW L105



(c) TRE L104

Figura 5.19: Comparativa L105 (sísmica) vs TRE L104.

De las tomografías eléctricas se observan dos comportamientos diferentes sobre terreno y sobre los depósitos

de jales. Para ambos sitios se observan dos unidades eléctricas, U1 y U2, pero estos varían en el rango de resistividad que presentan las tabla 5.6 *Clasificación de unidades eléctricas para suelo natural* y tabla 5.7 *Clasificación de unidades eléctricas sobre jales*. La relación de estos rangos de resistividad para ambas condiciones se presenta en las siguientes tablas, donde se asocian a un determinado tipo de material, de acuerdo con lo reportado de la exploración geotécnica.

Unidad	Tipo de material	Rango de resistividad [Ωm]
U1	Arena limosa	15 – 45
U2	Aluvión	45 – 200
U3	Arcilla o zonas de inundación	10

Tabla 5.6: Clasificación de las unidades eléctricas y su relación con tipos de material para TSF01 (suelo natural.)

U1 corresponde a materiales de baja resistividad, asociados a arenas limosas con humedad moderada; U2 agrupa depósitos aluviales de resistividad intermedia que reflejan mayor compactación y menor saturación; U3 representa zonas con alta conductividad .

Unidad	Tipo de material	Rango de resistividad [Ωm]
U1	Arcillas	10 – 35
U2	Arenas	35 – 80

Tabla 5.7: Clasificación de las unidades eléctricas y su relación con tipos de material para TSF01 (sobre jales.)

U1 indica materiales arcillosos con alto contenido de humedad y baja resistividad, U2 corresponde a arenas parcialmente compactas o con menor contenido de agua, que presentan valores intermedios de resistividad.

Las secciones localizadas sobre terreno muestran un comportamiento similar. Se observa la presencia de un material con altos resistivos en el rango de 45 a 200 Ωm cercanos a la superficie. Por debajo de esta unidad eléctrica, se tiene una segunda unidad eléctrica que presenta bajos resistivos en el rango de 10 a 45 Ωm . Debe tenerse en cuenta que durante los días que se realizaron las adquisiciones eléctricas, se presentaron lluvias en la zona de estudio. Por los valores de resistividad, esto representaría un suelo saturado de agua. Sin embargo, la información sobre presión de poro dinámica del piezocono presenta valores muy bajos, así mismo, no se detectó el manto freático en la exploración geotécnica, por lo que esta posibilidad no es viable.

5.1 Evaluación del Riesgo Sísmico de la Presa de Jales

Las presas de jales son estructuras críticas dentro de la industria minera, diseñadas para almacenar los residuos sólidos y líquidos producto del beneficio de minerales. Su estabilidad y desempeño bajo solicitaciones sísmicas constituyen un factor esencial de seguridad, tanto para la operación minera como para las comunidades y ecosistemas aguas abajo. Los eventos sísmicos pueden inducir deformaciones, licuación o incluso colapso parcial o total de estas estructuras, por lo que la evaluación del riesgo sísmico representa una herramienta fundamental para garantizar su integridad estructural y funcional durante toda su vida útil.

Existen diversas aproximaciones para evaluar el comportamiento sísmico de una presa de jales, que varían en complejidad y nivel de detalle según la información disponible y la categoría de consecuencia de la presa. De forma general, estas evaluaciones pueden agruparse en tres niveles:

1. Análisis pseudoestático, que aplica una fuerza sísmica equivalente sobre la masa de la presa para

determinar factores de seguridad bajo sollicitación lateral. Es un método simplificado y ampliamente utilizado para estudios preliminares o de cribado rápido.

2. Análisis de desplazamientos permanentes (método de Newmark), que estima el movimiento acumulado de la estructura una vez superada la aceleración de fluencia del talud, proporcionando una medida directa de daño potencial.
3. Análisis dinámico no lineal acoplado, que incorpora modelos constitutivos avanzados del material (arena, limo o mezcla de jales), considerando la generación y disipación de presiones de poro, ablandamiento cíclico y deformaciones permanentes durante el sismo.

La elección del método depende del nivel de detalle requerido, la criticidad de la presa y la disponibilidad de información geotécnica. Los métodos más avanzados permiten modelar fenómenos como la licuación, el ablandamiento cíclico o la pérdida de freeboard, mientras que los métodos simplificados, aunque más conservadores, proporcionan resultados suficientemente confiables para una primera estimación del desempeño estructural.

En todos los casos, el objetivo es establecer si la presa puede mantener su estabilidad y contención bajo los escenarios sísmicos definidos, generalmente asociados al Sismo de Diseño Operativo (DBE) y al Sismo Máximo Creíble (MCE). Los resultados permiten clasificar el riesgo, definir niveles de desempeño aceptables y, en caso necesario, proponer medidas de mitigación o refuerzo estructural.

- El Diseño Operativo (DBE), asociado a un nivel de desempeño funcional sin daños estructurales significativos.
- El Sismo Máximo Creíble (MCE), que representa el evento de mayor severidad razonablemente posible en la región.

Para cada nivel se selecciona un conjunto de acelerogramas reales o sintéticos compatibles con el espectro objetivo del sitio (Bommer & Acevedo, 2004; Hancock et al., 2008)[45],[46]. El proceso de escalamiento espectral se realiza siguiendo las recomendaciones de Kramer (1996) y Boore (2012) [47], garantizando que el promedio de los espectros de los registros escalados coincida dentro de $\pm 10\%$ con el espectro de diseño en el rango de periodos que cubre el modo fundamental del dique (T) y sus cercanías.

5.1.1 Análisis pseudoestático de estabilidad global

El análisis pseudoestático constituye la primera aproximación al comportamiento del talud bajo cargas sísmicas. Este método, introducido por Makdisi y Seed (1978) y formalizado por Seed (1979), aplica una fuerza horizontal equivalente $F = k_h W$ sobre la masa de la presa, donde k_h es el coeficiente sísmico horizontal y el peso del volumen deslizante. El valor de k_h se calcula como una fracción de la aceleración pico del suelo ($k_h = \alpha P G a$), siendo α típicamente de 0.1 a 0.3, según la categoría de consecuencia definida por guías internacionales (ICOLD, 2016; ANCOLD, 2019; GISTM, 2020).

El resultado del análisis se expresa mediante el factor de seguridad pseudoestático (FS), que se interpreta bajo los criterios recomendados por Duncan y Wright (2005) y Bray et al. (1998):

- $FS_{1,10}$ (DBE): condición estable.
- $1,0FS < 1,10$ (DBE) o $FS \approx 1,0$ (MCE): condición límite, requiere evaluación adicional.

- $FS < 1,0$: potencial inestabilidad, requiere análisis dinámico o medidas de mitigación.

Este paso permite identificar zonas críticas y estimar la aceleración de fluencia (k_y) correspondiente al inicio del deslizamiento (Makdisi & Seed, 1978) [48].

5.1.2 Estimación de desplazamientos permanentes (método de Newmark)

Si los resultados pseudoestáticos indican condiciones críticas, se aplica el método de bloque deslizante de Newmark (Newmark, 1965), el cual estima los desplazamientos acumulados que experimenta el talud cuando la aceleración del terreno excede la aceleración de fluencia k_y . El desplazamiento D_N se calcula integrando dos veces la aceleración efectiva sobre el umbral de fluencia:

$$D_N = \int_0^t \int_0^{t'} [a(t'') - k_y]^+ dt'' dt'$$

donde $[a - k_y]^+$ representa las porciones del registro donde la aceleración supera k_y . Este enfoque ha sido ampliamente validado por estudios empíricos (Makdisi & Seed, 1978; Ambraseys & Srbulov, 1995; Bray & Travararou, 2007)

Los resultados se expresan en términos de la mediana (P50) y el percentil 90 (P90) de los desplazamientos, calculados a partir del conjunto de registros representativos. Se adoptan criterios de desempeño recomendados por Bray y Travararou (2007) [49].

- $D_N < 10cm$: comportamiento estable
- 10–30cm: deformaciones moderadas; revisar capacidad hidráulica.
- $> 30cm$: deformaciones significativas; riesgo de pérdida de contención.

5.1.3 Evaluación del freeboard post-sismo

El desplazamiento Newmark se relaciona con la pérdida potencial de altura libre (freeboard) entre el nivel del agua y el coronamiento del dique. Se estima el asentamiento post-sismo como una fracción del desplazamiento calculado ($\Delta F_{sismo} \approx 0,2 - 0,4D_N$), dependiendo del tipo de material y la geometría del talud (Harder & Boulanger, 1997; Bray et al., 1998). El criterio de aceptación es:

$$F_{post} = F_{ini} - \Delta F_{sismo} \geq F_{min}$$

donde F_{ini} es el freeboard inicial y F_{min} el valor mínimo requerido por los estándares de seguridad operativa (ICOLD, 2016; GISTM, 2020). Si no se cumple esta condición, la presa se considera propensa a sobrepaso y se recomiendan acciones de refuerzo o aumento de coronamiento.

5.1.4 Integración de resultados y dictamen

Finalmente, se integran los resultados de los análisis pseudoestático, Newmark y freeboard para emitir un dictamen conforme a los objetivos de desempeño definidos por las guías internacionales de seguridad de presas de jales (ICOLD, 2016; ANCOLD, 2019; GISTM, 2020). El comportamiento sísmico se clasifica en tres categorías principales:

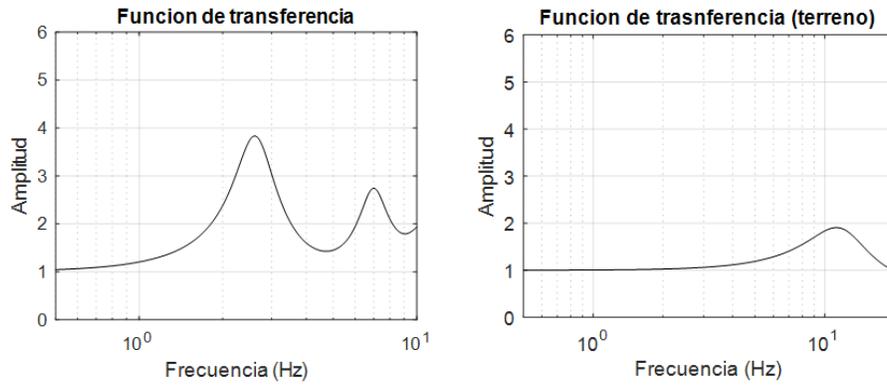


Figura 5.20: Función de transferencia estimada a partir del modelo sismoestratigrafico de la 5.8 para la presa de jales y el terreno

- Cumple: estabilidad adecuada bajo DBE y MCE, sin pérdida de contención.
- Marginal: deformaciones moderadas o reducción significativa del freeboard; requiere monitoreo o mitigación.
- No cumple: falla estructural o hidráulica probable; requiere rediseño o refuerzo inmediato.

Este enfoque integrado proporciona resultados robustos y reproducibles, apropiados tanto para evaluaciones de cribado como para análisis detallados de desempeño sísmico.

5.2 Evaluación de la Estabilidad Pseudoestática de la Presa de Jales

El depósito de jales está conformado por dos celdas adyacentes de dimensiones aproximadas de 800 m × 580 m y una altura total de 26 m. Ambas celdas presentan características geométricas y de conformación similares, por lo que se adoptó un modelo representativo único para el análisis pseudoestático. Estas celdas están construidas a partir de jales arenosos medianamente compactos, con una velocidad promedio de onda de corte, de acuerdo con los perfiles de velocidad determinados mediante el método. Con esta información se construyó un modelo sísmico unidimensional para la presa, mostrado en la Tabla XX, el cual fue empleado para el cálculo de la respuesta dinámica mediante el método de Thomson-Haskell (1962).

Capa	Espesor [m]	Velocidad V_s [$\frac{m}{s}$]	Densidad [$\frac{Kg}{m^3}$]	Amortiguamiento %	Material
1	4	190	1500	5	Jales superficiales
2	8	256	1500	5	Jales compactados
3	6.2	296	1500	5	Jales consolidados
4	8	320	1500	5	Transición jales-aluvión
5	13	600	1800	5	Aluvión
6		1100	2200	3	Caliza (basamento)

Tabla 5.8: Modelo sismoestratigrafico propuesto para la presa de jales

A partir del modelo sismoestratigráfico se calculó la función de transferencia teórica de la presa, obteniéndose una frecuencia fundamental de 2.6 Hz y una amplificación máxima de 3.8 veces.

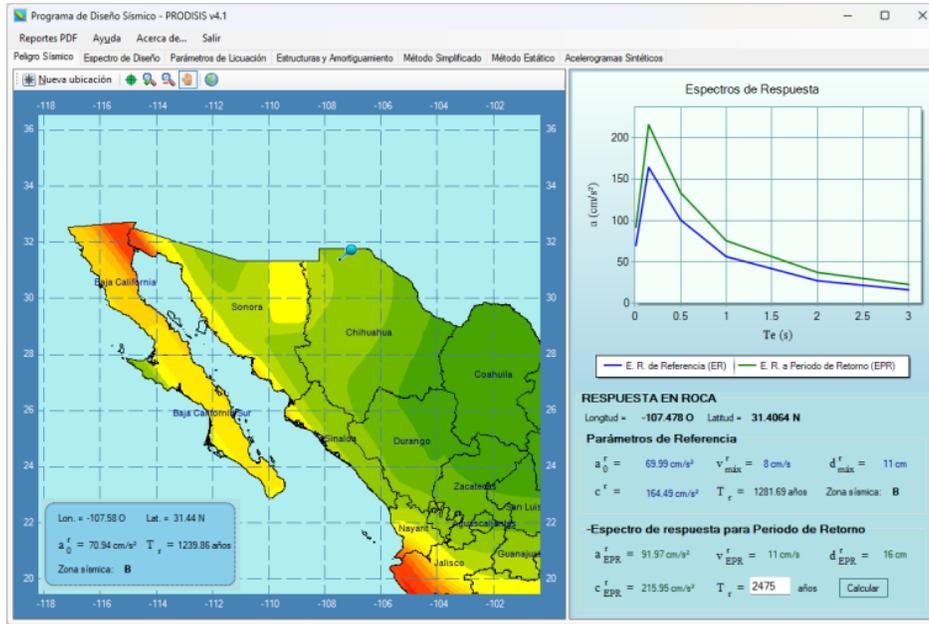


Figura 5.21: Cálculo del periodo de retorno de 2475 años para la zona de estudio empleando el programa Prodisis v4.1.

Con el fin de estimar la demanda sísmica esperada en el sitio, se empleó el programa computacional PRODISIS v4.1, el cual permite generar espectros de respuesta elástica con diferentes periodos de retorno. A partir de las coordenadas del sitio se obtuvo el espectro de peligro uniforme (UHS) correspondiente al nivel de amenaza regional. Inicialmente, el programa arrojó un período de retorno óptimo de 1281 años; sin embargo, para el análisis de riesgo estructural se adoptó el nivel máximo considerado (MCE), asociado a un período de retorno de 2475 años, con el fin de evaluar la respuesta de la presa ante un evento extremo. Para este período se tiene la aceleración en roca de 91.9 cm/s² o bien de 0.09 g.

En la Figura 5.21 se presenta el espectro de respuesta obtenido para el periodo de retorno de 2475 años (línea verde), que constituye la base para el análisis dinámico y pseudoestático subsecuente.

Con base en el espectro de peligro uniforme obtenido para un periodo de retorno de 2475 años (nivel máximo considerado, MCE), se adoptó una aceleración máxima de diseño de 0.09 g, representativa de las condiciones sísmicas del sitio. Este valor fue utilizado como aceleración horizontal pseudoestática (k_h) en la evaluación de la estabilidad global del talud aguas abajo de la presa de jales.

El análisis pseudoestático se efectuó siguiendo los criterios de equilibrio límite, en los cuales la fuerza sísmica equivalente se modela como una fracción del peso propio del talud, actuando en dirección horizontal. La estabilidad del talud se expresa mediante el factor de seguridad (FS), que para condiciones pseudoestáticas se define como:

$$FS = \frac{\text{Fuerzas resistentes}}{\text{Fuerzas deslizantes} + \text{Fuerzas sísmicas}}$$

El procedimiento consiste en evaluar el FS para diferentes valores k_h de hasta identificar el valor crítico k_y correspondiente a $FS = 1,0$, conocido como la aceleración de fluencia. Dicho parámetro indica la intensidad sísmica a partir de la cual el talud comenzaría a moverse.

De acuerdo con los parámetros geotécnicos del material de jales y la geometría de la presa (pendiente promedio $2H : 1V$, $\phi' = 32$, $\gamma = 15k[\frac{N}{m^3}]$, se puede estimar el valor k_y .

El k_y (aceleración de fluencia) se calcula con el modelo de talud infinito pseudoestático, asumiendo un material homogéneo sin cohesión ($c' = 0$), lo cual es una aproximación conservadora para una presa de jales arenosos. El equilibrio límite se define por:

$$FS = \frac{\tan\phi' \cos\beta - k_h \sin\beta}{\sin\beta + k_h \cos\beta}$$

y al imponer $FS = 1,0$, se despeja $k_h = k_y$:

$$k_y = \frac{\tan\phi' \cos\beta - \sin\beta}{\tan\phi' \sin\beta + \cos\beta}$$

De nuestros datos se tiene

- Pendiente: $2H : 1V, \beta = \tan^{-1}(1/2) = 26,6$
- Angulo de fricción: $\phi' = 32$ (jales medianamente compactos)
- Cohesión $c' = 0$, peso específico $\gamma = 15[\frac{kN}{m^3}]$ (solo sirve para cálculo de FS, no para k_y)

Entonces:

$$\tan\phi' = 0,625, \sin\beta = 0,449, \cos\beta = 0,894$$

Sustituyendo:

$$k_y = \frac{(0,625)(0,894) - 0,449}{(0,625)(0,449) + 0,894} = \frac{0,558 - 0,449}{0,280 + 0,894} = \frac{0,109}{1,174} = 0,093$$

Se estimó un $k_y = 0,093g$ mediante el enfoque de talud infinito (Seed, 1979; Kramer, 1996)[50]. Este valor resulta prácticamente igual a la aceleración máxima esperada en el sitio ($PGA = 0,09g$), lo que indica que el talud no alcanzaría la condición de falla incipiente bajo el evento sísmico de diseño. En consecuencia, la presa se considera estructuralmente estable y no se prevén desplazamientos permanentes significativos ante el nivel sísmico máximo considerado (MCE, 2475 años).

El cociente $k_y/PGA \approx 1,0$ confirma que la aceleración de fluencia es igual o ligeramente superior a la excitación sísmica esperada, por lo que la presa se considera estable ante un evento de diseño con un periodo de retorno de 2475 años. Bajo este nivel de amenaza, el desplazamiento y la deformación permanente del talud serían despreciables, y la presa conservaría su capacidad estructural y funcional posterior al sismo.

6 Conclusiones

Este trabajo tuvo como objetivo caracterizar el subsuelo de una presa de jales en el estado de Chihuahua utilizando métodos geofísicos sísmicos (refracción y MASW) y eléctricos (tomografía de resistividad). La investigación partió de la idea de que al combinar estas técnicas es posible modelar y distinguir las diferentes unidades internas del depósito, aportando información clave para valorar su estabilidad.

Los resultados muestran que cada método, por separado, brinda información útil pero limitada: la refracción sísmica y el MASW ayudaron a reconocer contrastes en la rigidez del subsuelo y a estimar espesores de materiales poco y medianamente consolidados, mientras que la tomografía eléctrica permitió separar zonas con distinta resistividad, relacionadas con cambios de humedad, compacidad y granulometría. Al integrar los métodos, se encontró una clara correspondencia entre zonas de baja velocidad y baja resistividad (materiales más blandos o húmedos) frente a áreas con mayores velocidades y resistividades (estratos más firmes y competentes).

De manera general, se identificaron patrones consistentes que permiten diferenciar el terreno natural de los depósitos de jales, además de variaciones laterales que reflejan heterogeneidad interna y posibles estructuras de debilidad. Estos hallazgos respaldan la hipótesis inicial y cumplen con el objetivo principal de evaluar la presa mediante un enfoque multimétodo.

Es importante mencionar algunas limitaciones: la resolución depende de la geometría de los arreglos, las diferencias entre métodos se deben a que cada uno responde a propiedades distintas (rigidez vs. humedad), y la falta de más sondeos directos limita la validación litológica. Aun con estas restricciones, el procedimiento planteado ofrece una metodología replicable en otras presas de jales o en proyectos similares.

Los resultados obtenidos mediante la exploración geofísica constituyen un elemento clave en la evaluación sísmica de la presa de jales, ya que permiten caracterizar las propiedades dinámicas tanto del cuerpo de la presa como de su fundación. El valor promedio de velocidad de onda de corte ($V_S = 292 \frac{m}{s}$) ubica el sitio dentro de la clasificación tipo D conforme a la norma NEHRP, indicando un terreno de rigidez media a blanda con potencial de amplificación sísmica.

A partir del modelo sismoestratigráfico y del análisis de respuesta unidimensional (Thomson–Haskell, 1962), se estimó una frecuencia fundamental de la presa de 2.6 Hz, equivalente a un período natural de 0.38 s. En el caso del terreno se estimó una frecuencia fundamental de 11 Hz o bien 0.09 s. Esto indica que la posibilidad de acoplamiento resonante entre el movimiento del terreno y la respuesta dinámica de la presa es muy baja.

Si bien la presa de jales presenta valores de velocidad de onda de corte promedio de 290 m/s, la integración de estos parámetros geofísicos en el análisis pseudoestático permitió establecer una evaluación más realista del comportamiento dinámico de la presa, demostrando que la respuesta sísmica local depende no solo de la geometría del talud, sino también de la rigidez dinámica y del contraste de velocidades en profundidad. En conjunto, los resultados indican que la presa mantiene un comportamiento estructural estable incluso considerando la amplificación local del terreno, lo que refuerza la validez del modelo geotécnico y su consistencia con los resultados pseudoestáticos.

Las anomalías detectadas en las tomografías de resistividad eléctrica (TRE) marcadas con líneas punteadas y que llamamos discontinuidades así como los cambios en el comportamiento de resistividad no representan, por sí mismas, una amenaza inmediata para la estabilidad de la presa, pero sí constituyen zonas que merecen especial atención en el monitoreo y mantenimiento futuro. Estas variaciones localizadas de resistividad particularmente aquellas asociadas a valores bajos pueden indicar incrementos en la humedad, presencia

de materiales finos o cambios en la compactación, factores que, bajo condiciones extremas o de saturación prolongada, podrían favorecer procesos de filtración o pérdida de rigidez.

Sin embargo, al correlacionar estas anomalías con los resultados sísmicos y con la información de riesgo sísmico, no se observa una correspondencia directa con zonas de debilidad estructural significativa. Por el contrario, el comportamiento general de la presa muestra coherencia y estabilidad en sus parámetros dinámicos y eléctricos, lo que sugiere que las anomalías corresponden más a heterogeneidades naturales del material que a indicios de falla incipiente.

Por otro lado, comparando los resultados mediante el uso de software libre y software comercial, se observa que con ambos programas informáticos se obtiene una geometría del subsuelo y unas unidades que guardan cierta similitud. Sin embargo, para los resultados de TSF-01 y TSF-02 (parte superior de los jales y parte de suelo natural correspondientemente), esto puede ser al momento de la interpolación que se utiliza para graficar ya que los resultados se ven un tanto diferentes como en el caso de 5.2 en la parte central donde las zonas de velocidad que corresponden a $900(m/s)$ el cual se ve de forma poco suavizada, es por ello que se toma con cuidado y se concluye que la resolución y la sensibilidad ante ciertos contrastes es limitada.

En el caso de los terrenos firmes los cuales corresponden a los perfiles 101 a 106, y 115, 116 que tienen contrastes marcados en las propiedades físicas de velocidad de onda P, correspondiente a TSF-01 que se pueden ver en las figuras 5.1 y 5.2 el software libre muestra un desempeño satisfactorio, logrando modelar correctamente las transiciones entre materiales y reflejar de manera coherente los espesores de las unidades geofísicas. No obstante, cuando se trata de variaciones sutiles o graduales como en el caso de las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 los cuales tienen zonas de baja velocidad, es decir valores menores a $800(m/s)$ o resistividad baja que tiene valores menores a $60(\Omega m)$ como se puede ver en las figuras 5.13, 5.14, 5.15 el software libre presenta limitaciones, generando áreas que aparentan ser de baja competencia o de alta heterogeneidad que no se corresponden con lo observado en los resultados del software comercial ni con las dromocronas de campo.

Estas diferencias podrían atribuirse tanto a los algoritmos de inversión empleados como a los métodos de interpolación y suavizado que cada plataforma utiliza. Mientras que el software comercial tiende a aplicar un suavizado más robusto, el software libre, puede requerir una configuración más cuidadosa de parámetros para obtener resultados equivalentes. En consecuencia, se reconoce el valor del software libre como una herramienta de investigación accesible y flexible, pero también la necesidad de validar sus resultados frente a soluciones comerciales cuando se busca una interpretación de alta precisión.

En conclusión, la aplicación conjunta de métodos sísmicos y eléctricos se confirma como una herramienta práctica y efectiva para caracterizar depósitos mineros, aportar elementos al análisis de estabilidad y servir como base para futuras labores de monitoreo, validación y gestión de riesgos.

Bibliografía

- [1] Servicio Geológico Mexicano. *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana 2023 (Edición 2024)*. https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2023_Edicion_2024.pdf. Secretaría de Economía, Gobierno de México. [PDF]. 2024.
- [2] SEMARNAT. “Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales”. En: *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación* (2004).
- [3] Luca Ferrari, Martín Valencia-Moreno y Scott Bryan. “Geology of the Sierra Madre Occidental volcanic province of Mexico: Field trip guidebook and overview”. En: *Geological Society of America Field Guide 8* (2007), págs. 1-39. doi: 10.1130/2007.fld008(01).
- [4] Fernando Ortega-Gutiérrez y J. C. Guerrero-García. “The Geologic Regions of Mexico”. En: *Geofísica Internacional 21.1* (1982), págs. 67-76.
- [5] Fernando Ortega-Gutiérrez. *Carta geológica de la República Mexicana, escala 1:2,000,000 / Texto explicativo de la quinta edición*. Ed. por Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. 1992.
- [6] Gerald Osborn. “Recognition of crustal extension in the Basin and Range Province: A history”. En: *Geosphere 20.5* (2024), págs. 1247-1275. doi: 10.1130/GES02758.1.
- [7] Servicio Geológico Mexicano. *Carta Geológico-Minera H13-A42, Villa Ahumada, Chihuahua*. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/571_H13-A42_GM.pdf. Escala 1:250,000. Edición 2005. Servicio Geológico Mexicano, Pachuca, Hidalgo, México. 2005.
- [8] Comisión Federal de Electricidad. *PRODISIS: Programa de Diseño Sísmico de Estructuras*. <https://app.cfe.mx/aplicaciones/ccs/peee/prodisis.aspx>. Mapa de regionalización sísmica de México. Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Transmisión, Gerencia de Ingeniería Civil, México. Ciudad de México, México, 2015.
- [9] Wikipedia. *Sismo de Parral de 1928*. https://es.wikipedia.org/wiki/Sismo_de_Parral_de_1928. Consultado el 21 de agosto de 2025. 2025.
- [10] Wikipedia. *Sismo de Chihuahua de 2013*. https://es.wikipedia.org/wiki/Sismo_de_Chihuahua_de_2013. Consultado el 21 de agosto de 2025. 2025.
- [11] Max Suter. *Neotectonics of Northeastern Sonora, Mexico*. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90137-T](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90137-T). Vol. 198, Issues 2–4, pp. 205–221, Elsevier. 1991.
- [12] Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). *A 135 años del sismo de Bavispe, Sonora*. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/a-135-anos-del-sismo-de-bavispe-sonora>. Consultado en junio de 2025, Gobierno de México. 2022.
- [13] Max Suter. *A catalog of earthquakes in northwestern Mexico and southern Arizona from 1535 to 2010*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089598112100034X>. Journal of South American Earth Sciences, vol. 107, 103055. 2021.
- [14] Servicio Sismológico Nacional (SSN). *Catálogo de Sismos*. <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>. Consultado en junio de 2025, Universidad Nacional Autónoma de México. 2025.
- [15] Robert J. Twiss y Eldridge M. Moores. *Structural Geology*. ISBN: 9780716749516. 2007.

- [16] International Commission on Large Dams (ICOLD) Chile Committee. *Bulletin No. 181: Tailings Dam Design – Technology Update*. PDF file. <https://www.icoldchile.cl/boletines/181.pdf>. 2019.
- [17] Alberto Jaime y Juan Sanabria. “Aspectos geotécnicos en operaciones Mineras”. En: *XX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica* (2018).
- [18] W. M. Telford, L. P. Geldart y R. E. Sheriff. *Applied Geophysics*. ISBN 978-0521339384. 1990.
- [19] Philip Kearey, Keith A. Klepeis y Frederick J. Vine. *Global Tectonics*. 2013.
- [20] Robert E. Sheriff y Loyd P. Geldart. *Exploration Seismology*. DOI: 10.1017/CBO9781139168359. Incluye teoría de propagación de ondas, dromocronas y ecuaciones de tiempo-distancia. 1995.
- [21] Derecke Palmer. *The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation*. ISBN 978-0931830143. Obra especializada que valida el cálculo de profundidades mediante tiempos de intercepto. 1980.
- [22] Victor José Cavalcanti Bezerra Guedes, Susanne Taina Ramalho Maciel y Marcelo Peres Rocha. “Refrapy: A Python program for seismic refraction data analysis”. En: *Computers & Geosciences* 159 (2022), pág. 105020. doi: 10.1016/j.cageo.2021.105020.
- [23] Markus Båth. “An analysis of the time term method in refraction seismology”. En: *Tectonophysics* 51.3–4 (1978), págs. 155-169. doi: 10.1016/0040-1951(78)90238-X.
- [24] University of Saskatchewan. *Refraction method notes: delay-time and plus-minus relations*. https://seisweb.usask.ca/classes/GEOL483/2016/Lectures/PDF/12-Refraction_method.pdf. 2016.
- [25] Carsten Rücker, Thomas Günther y Florian M. Wagner. “pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics”. En: *Computers & Geosciences* 109 (2017), págs. 106-123. doi: 10.1016/j.cageo.2017.07.011.
- [26] Geodevice. *ZONDST2D User Manual*. https://geodevice.co/upload/iblock/b91/vf21u6kz4rmdycl2i4z87/ZondST2D_eng.pdf. 2022.
- [27] Geodevice. *ZondST2D — 2D Seismic Data Interpretation Software*. <https://geodevice.co/product/zondst2d/>. 2022.
- [28] C. B. Park, R. D. Miller y J. Xia. *Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW): Expanded Abstract*. Expanded Abstracts, SEG Annual Meeting. 1997.
- [29] Sebastiano Foti et al. *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. 2014.
- [30] Keiiti Aki y Paul G. Richards. *Quantitative Seismology*. 2002.
- [31] N. Autor. *Curvas de dispersión empleadas en el modelado*. Documento interno, Anexo de la tesis. 2025.
- [32] John M. Reynolds. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. 2011.
- [33] George V. Keller y Frank C. Frischknecht. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. 1966.
- [34] Meng-Hua Loke. *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*. Online manual, Geotomo Software. 2015.
- [35] Torleif Dahlin y Bin Zhou. “Effect of data density on 2D resistivity imaging”. En: *Near Surface Geophysics* 2.2 (2004), págs. 113-123.
- [36] Meng-Hua Loke y R. D. Barker. *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*. *Geophysical Prospecting*, 44(1), 131–152. 1996.

- [37] Peter Stummer, Hansruedi Maurer y Alan G. Green. “Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information”. En: *Geophysics* 69.1 (2004), págs. 120-139. DOI: 10.1190/1.1649381.
- [38] Torleif Dahlin y Bin Zhou. “A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays”. En: *Geophysical Prospecting* 52.5 (2004), págs. 379-398. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x.
- [39] Marine Audebert et al. “Understanding leachate flow in municipal solid waste landfills by combining time-lapse ERT and subsurface flow modelling – Part II: Constraint methodology of hydrodynamic models”. En: *Waste Management* 55 (2016), págs. 176-190. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.04.005.
- [40] Thomas Blanchy et al. “ResIPy: An intuitive open-source software for complex geoelectrical inversion”. En: *Computers & Geosciences* 137 (2020), pág. 104423. DOI: 10.1016/j.cageo.2019.104423.
- [41] Python Software Foundation. *Python (Versión 3.x)*. <https://www.python.org>. [Software]. 2023.
- [42] NERPH. *Clasificación de suelos según la Norma Española de Recomendaciones para la Protección Hidrosanitaria (NERPH)*. Documento técnico de referencia en ingeniería geotécnica y clasificación de suelos. Incluye correlaciones entre velocidad de onda de corte (V_s), ensayo SPT y categorías de suelo. Madrid, España, 2002.
- [43] Meng-Hua Loke. *Tutorial: Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*. Penang, Malaysia: Geotomo Software, 2010. URL: <https://www.geotomosoft.com/downloads.php>.
- [44] G. J. Palacky. “Resistivity Characteristics of Geologic Targets”. En: *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 1, Theory*. Ed. por M. N. Nabighian. Tulsa, Oklahoma, USA: Society of Exploration Geophysicists, 1987, págs. 53-129. DOI: 10.1190/1.9781560802631.ch3.
- [45] Julian J Bommer y Ana Beatriz Acevedo. “The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis”. En: *Journal of Earthquake Engineering* 8.spec01 (2004), págs. 43-91.
- [46] Jonathan Hancock, Julian J Bommer y Peter J Stafford. “Numbers of scaled and matched accelerograms required for inelastic dynamic analyses”. En: *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 37.14 (2008), págs. 1585-1607.
- [47] David M Boore y Eric M Thompson. “Empirical improvements for estimating earthquake response spectra with random-vibration theory”. En: *Bulletin of the Seismological Society of America* 102.2 (2012), págs. 761-772.
- [48] Faiz I Makdisi y H Bolton Seed. “Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations”. En: *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 104.7 (1978), págs. 849-867.
- [49] Jonathan D. Bray y Theodora Travararou. “Simplified Procedure for Estimating Earthquake-Induced Deviations in Slopes”. En: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133.4 (2007), págs. 381-392. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(381).
- [50] H Bolton Seed. “Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams”. En: *Geotechnique* 29.3 (1979), págs. 215-263.
- [51] Golden Software, LLC. *Surfer, Version 13*. <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>. Software de análisis y visualización de superficies. Golden, Colorado, USA, 2014.

7 Anexos

7.1 Pre-procesado

7.1.1 Datos iniciales

Para empezar, se fueron proporcionados los datos correspondientes a la presente tesis los que tienen extensión .dat lo cual fue un primer obstáculo ya que el software que lleva por nombre Refrapy”no lee los archivos .dat esto a causa de algún problema al momento de generar el encabezado, por lo tanto, se transformaron a formato .sgy. Lo cual se pudo hacer gracias al software geogiga. en el cual se indica el espaciamiento de los geófonos, la ubicación, etc.

7.1.2 Conversión a .sgy

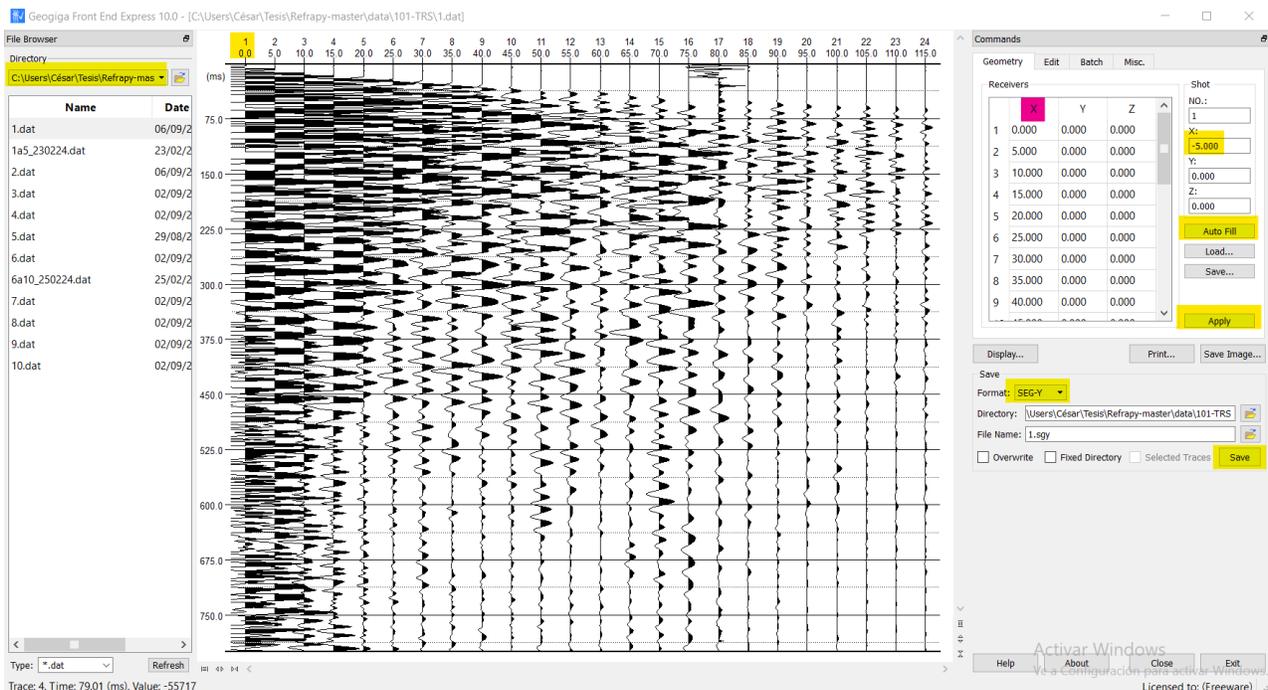


Figura 7.1: Esquema teórico del viaje de ondas sísmicas

Donde las partes más importantes a considerar son las que están subrayadas, para esta parte no es necesario cierto orden, lo que se tiene que realizar es lo siguiente:

- Para iniciar nos tenemos que dirigir al directorio el cual se muestra en la parte superior izquierda, ya que nos encontremos allí se va a desplegar una ventana emergente en la cual se tiene que indicar donde es que están nuestros datos para ser convertidos. Una vez que ya lo hicimos tendremos acceso a los datos que estén en esa ubicación.
- En la letra x subrayada de color rosa se indican los números que corresponden a la separación entre

nuestros geófonos y una vez que ya pusimos, al menos los primeros dos en este caso lo correspondiente a 0,5. Ahora nos dirigimos a **auto fill** lo cual nos permite llenar todos los espacios con el espaciamiento que detecta por lo cual siempre es necesario revisar.

- En la parte derecha vemos marcada una letra x la cual corresponde a la ubicación de la fuente por lo que se tiene que modificar también.
- A continuación nos dirigimos a la sección que tiene el nombre de **Apply** se verán reflejados los cambios en la zona gráfica de la izquierda con la que ya obtenemos la geometría que deseamos.
- Por último y habiendo revisado todo para estar completamente seguro se indica que el archivo que queremos es con **SEG-Y**, vamos a **save** y ya tenemos nuestro archivo con extensión .sgy

7.2 Refracción Sísmica

Se trabajó con el software "Refrapy" el cual tiene dos módulos

- Refrapick
- Refrainv

7.2.1 Refrapick

Consiste en un programa que se ejecuta con el lenguaje de programación python el cual nos permite indicar los primeros arribos de la onda P, los archivos con los que trabaja son .sg2 y .sgy.

Para esta primera parte lo que hice fue pasar los archivos con extensión .dat a .sgy, cosa que en el caso de la instalación del programa Refrapy que tengo tiene un problema para leer los encabezados de los archivos .sg2 por lo que al ingresar los .sgy se tiene que indicar la geometría donde las cosas que se nos solicita llenar para cada una de las mediciones.

- receiver spacing
- First receiver
- Source position
- Delay

Una vez que ya se tienen desplegadas las ondas se activa el módulo para picar los primeros arribos de onda P.

Ya que se indicaron todos los arribos con la fuente determinada se cambia a la fuente que sigue y así hasta acabar con todas con lo que se procede a guardar un archivo con extensión **.sgt** que nos va a servir al momento de la inversión, sin embargo antes de cerrar el software vamos a guardar todas las domocrónicas que nos despliega refrapick las cuales nos van a servir para el cálculo de espesor de primeras capas que se utilizará al momento de hacer el análisis de ondas superficiales.

A continuación se presenta un manual general para el procedimiento antes descrito

Secuencia de procesamiento

Para empezar se tiene que abrir nuestro anaconda prompt como administrador, una vez que ya estamos allí se le indica un cambio de directorio con el comando **cd** seguido de la dirección donde se tienen los archivos del programa que ya se descargó previamente y se indica en la sección A continuación se tiene que activar el ambiente en el cual descargamos las librerías necesarias que por default es **pg**, sin embargo puede ser cualquier nombre que se le haya dado, finalmente para poder correr Refrapick es el comando **python Refrapick.py** como se muestra a continuación.

```
Administrador: Anaconda Prompt
(base) C:\Windows\system32>cd C:\Users\César\Tesis\Refrapy-master
(base) C:\Users\César\Tesis\Refrapy-master>conda activate pg
(pg) C:\Users\César\Tesis\Refrapy-master>python Refrapick.py
```

Figura 7.2: Muestra de uso correcto de Anaconda Prompt

Esto nos va a desplegar la interfaz gráfica que se muestra en la siguiente imagen



Figura 7.3: Interfaz gráfica de refrapick

En la cual con la flecha se indica el símbolo para crear un nuevo proyecto que tendrá las cuatro carpetas ya mencionadas antes con lo que podremos empezar a usar nuestros datos.

Para continuar se va a seleccionar la opción correspondiente para abrir el proyecto que recién se creó como veremos en la siguiente figura



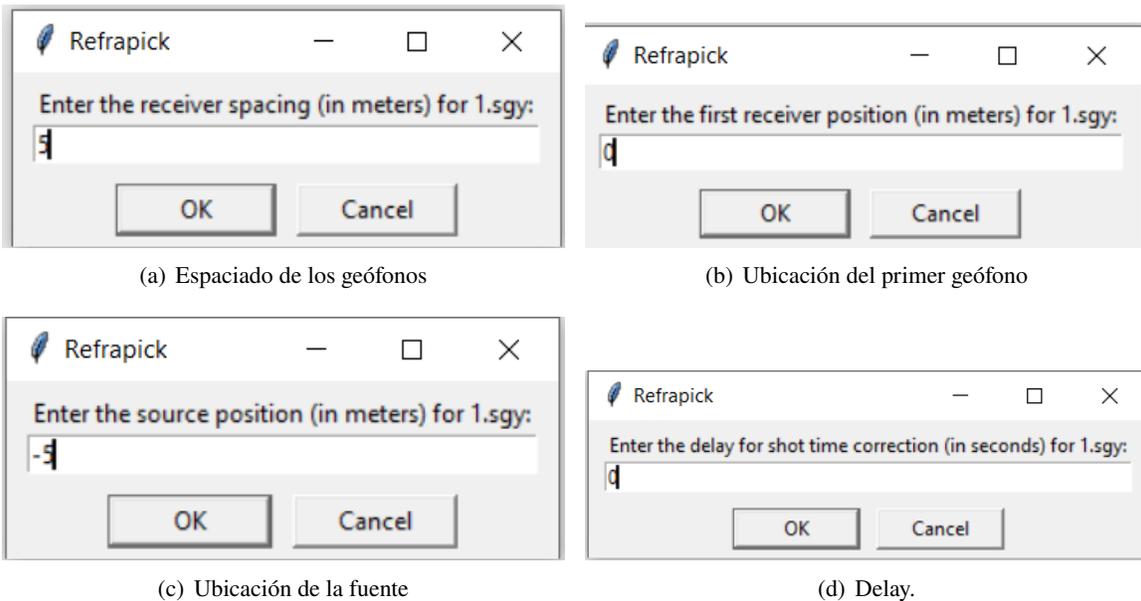
Figura 7.4: Cargar proyecto en Refrapick.

Es importante que ya tengamos los archivos con extensión **.sgy** en la carpeta que lleva por nombre **data** correspondiente a nuestro proyecto, los cuales se van a poder abrir con el ícono que se puede observar en la figura



Figura 7.5: Cargar las trazas sísmicas

En el momento en que ya seleccionemos nuestros archivos .sgy se nos van a pedir una serie de cosas que se comentaron en la primera parte lo cual se ve de la siguiente forma



(a) Espaciado de los geófonos

(b) Ubicación del primer geófono

(c) Ubicación de la fuente

(d) Delay.

Figura 7.6: Instrucciones para leer trazas sísmicas.

Una vez que ya se efectuó para todos los archivos correspondientes podemos jugar con el como se ven, principalmente con los botones que se muestran en la figura Ahora se va a picar el primer arribo de la onda P en cada uno de los receptores, cosa que se puede hacer con el comando de permitir el modo picado que se puede observar en la figura

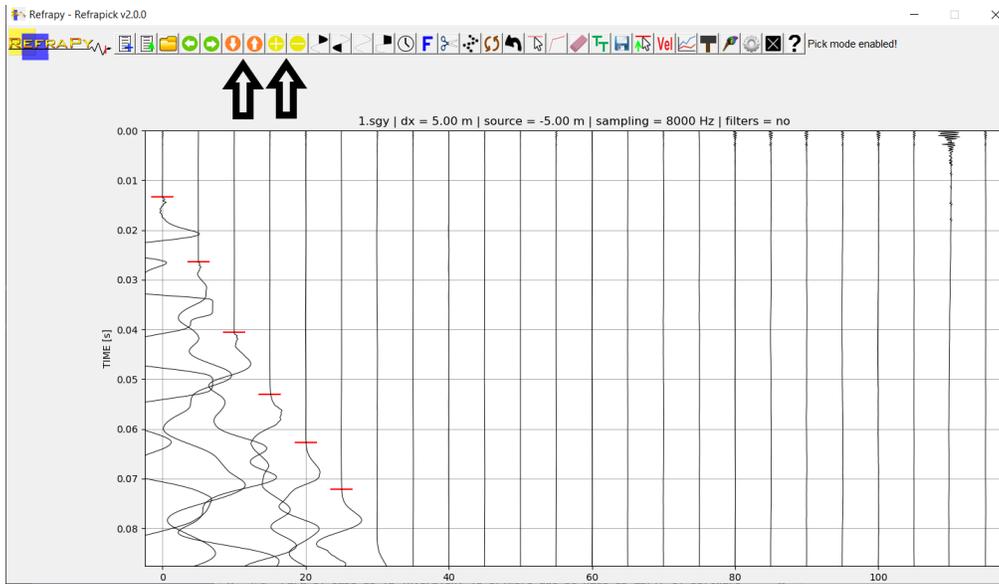


Figura 7.7: Modificar visualización de trazas

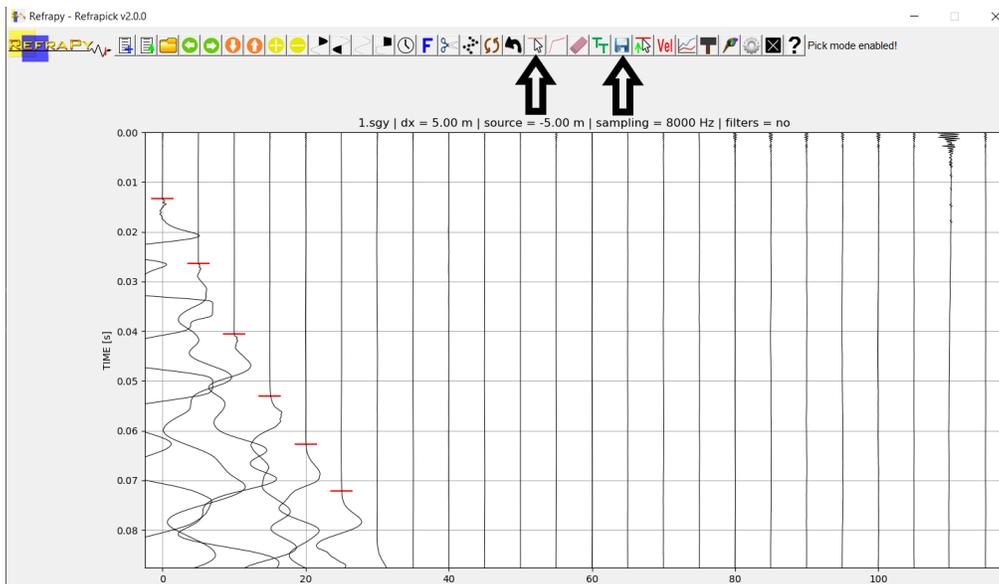


Figura 7.8: Permitir el modo picar y guardar

Es importante recordar que esto es solo para uno de los archivos por lo que para explorar los demás se tienen que picar los íconos que tienen flechas horizontales. Una vez que concluimos con todos los picados se procede a guardar el archivo que será un .sgt y se tiene que ubicar en la carpeta de picks.

Ahora se tiene que picar el siguiente ícono en el cual se nos van a mostrar los puntos que picamos lo cual es conocido como domocronicas las cuales nos van a servir más adelante para el cálculo de modelo inicial sobre todo en la parte del espesor de capa

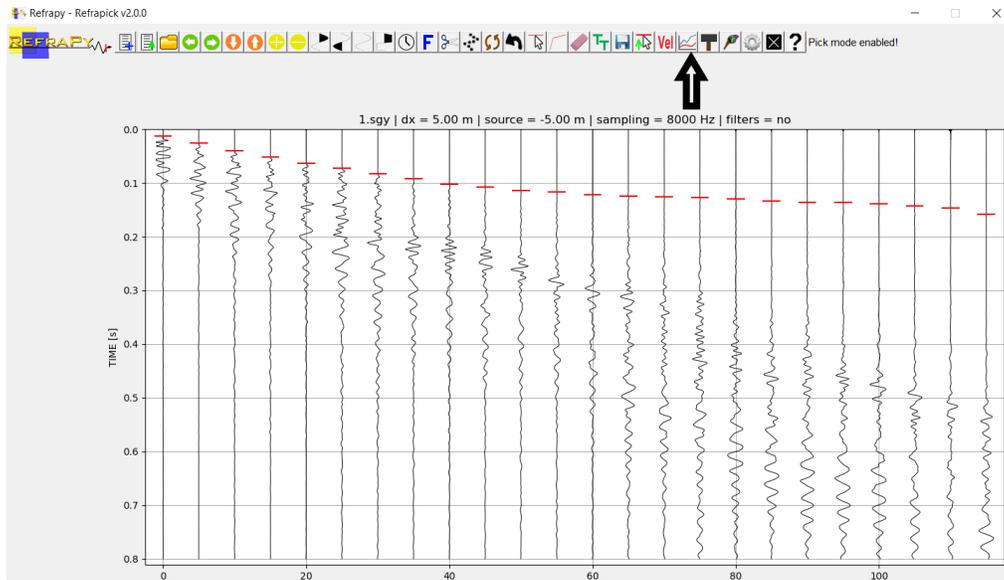


Figura 7.9: Desplegar domocrónicas

Por último, esta imagen es la que vamos a guardar y esto se hace con el ícono de guardado en la esquina inferior izquierda lo cual podemos ver con el ejemplo correspondiente.

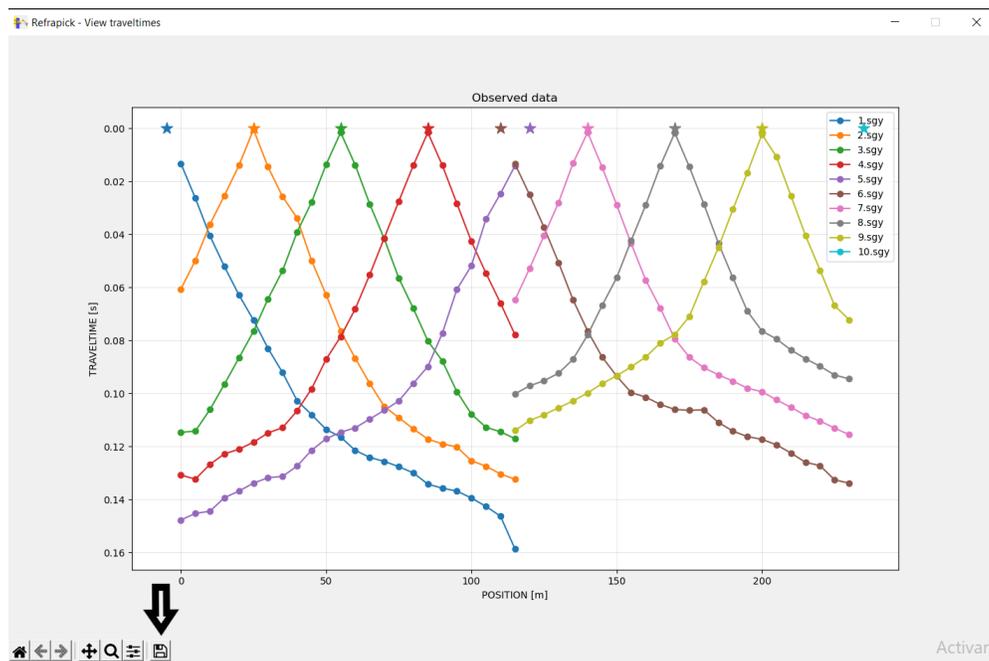


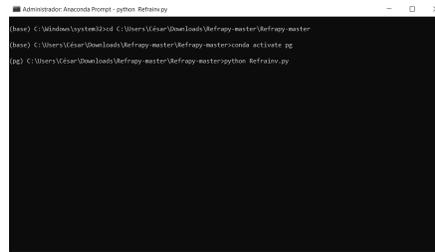
Figura 7.10: Guardar domocrónicas

Finalizamos este proceso por lo cual podemos cerrar el software.

Nota: Esto se hizo para las 16 líneas de refracción sísmica de la zona de estudio.

7.2.2 Refrainv

En el caso la inversión, lo primero que se hace es abrir el software igual que se hizo antes pero ahora con el comando **python Refrainv.py** como se muestra en la figura



```
Administrador de Consola Prompt - python Refrainv.py
(Use) C:\Windows\system32\cmd C:\Users\Cesar\Downloads\Refrainv-master\Refrainv-master
(Use) C:\Users\Cesar\Downloads\Refrainv-master\Refrainv-master>conda activate pg
(pg) C:\Users\Cesar\Downloads\Refrainv-master\Refrainv-master>python Refrainv.py
```

Figura 7.11: Refrainv

Una vez que se ejecuta el programa vamos a cargar la ruta del proyecto en la cual se cumplen los requisitos de carpeta ya mencionados en la sección de Refracción



Figura 7.12:

Una vez que ya fue cargado el proyecto se procede a agregar los picados que ya hicimos anteriormente con Refrapy los cuales tienen como formato **.sgt** y están ubicados en la carpeta que lleva por nombre **picks** tal como se muestra en las siguientes imágenes.

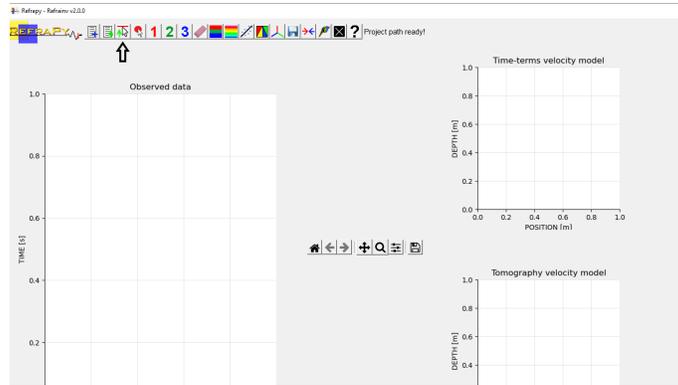


Figura 7.13: Ícono de picados

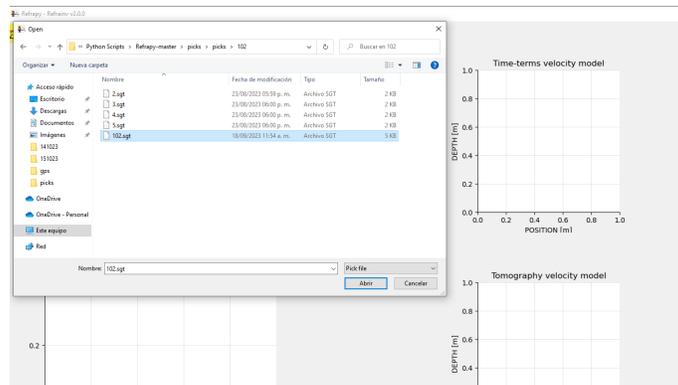


Figura 7.14: Selección de archivos

Una vez que ya están cargados dichos archivos van a ser desplegados en la ventana del lado izquierdo como lo vemos a continuación

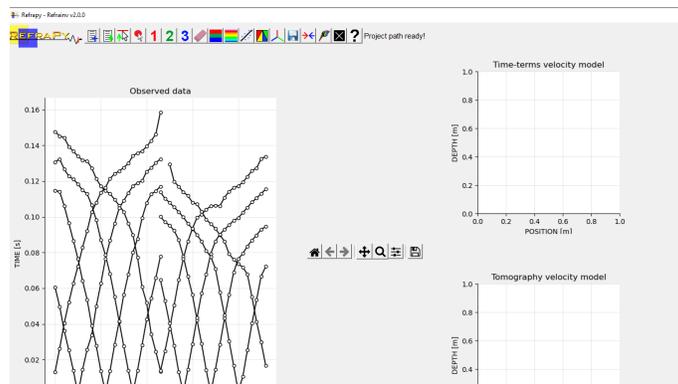


Figura 7.15: Picados cargados

A continuación lo que se hace es hacer la inversión para lo cual tenemos que dar click en el ícono que se nos muestra a continuación.

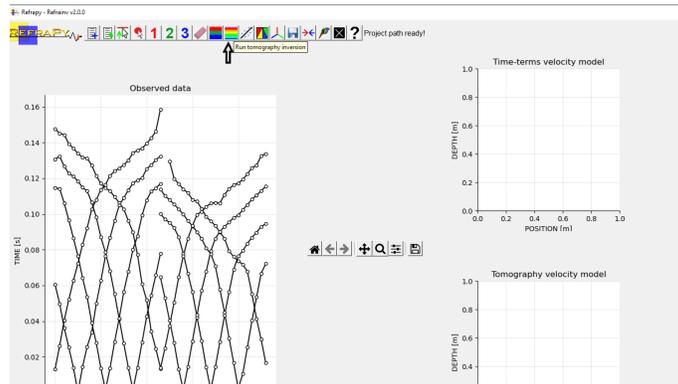


Figura 7.16: Ícono de inversión

Esto despliega una opción para hacer una malla la cual nos ayuda a colocar la respuesta de las ondas con mayor precisión, en esta parte se pueden modificar las características de la malla ya comentada, sin embargo para este trabajo no se modificaron ya que esto hace que se necesiten más recursos computacionales lo cual al ser hecho con una computadora personal es una limitante.

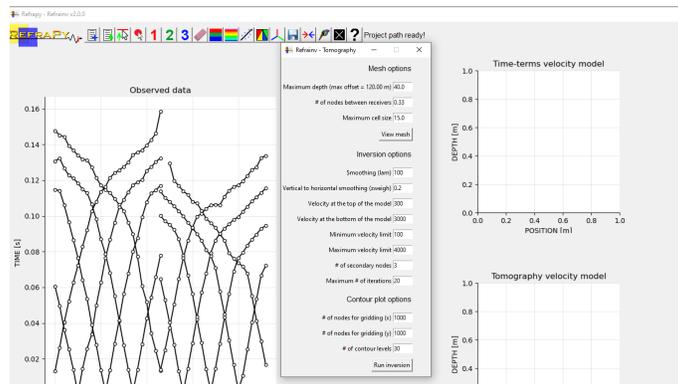


Figura 7.17: Parámetros de la malla

Una vez que ya estamos conformes con nuestros parámetros se da click en la parte de **view mesh**

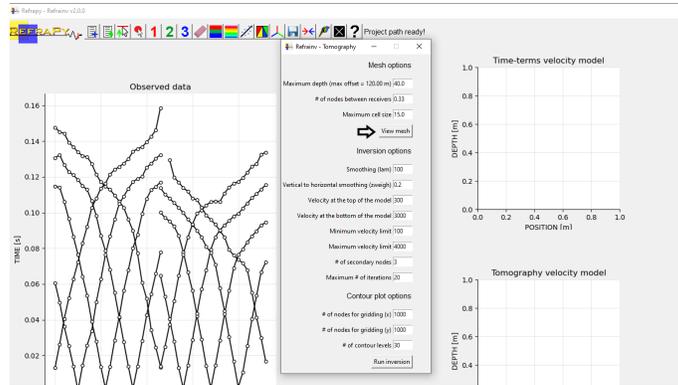


Figura 7.18: Ejemplo de visualización de la malla

En la imagen que se muestra en la parte inferior se ve un ejemplo de la malla construida

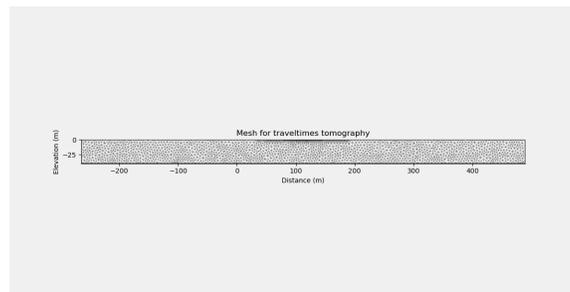


Figura 7.19: Ejemplo de visualización de la malla

Una vez que ya tenemos la malla construida se procede a realizar el proceso de inversión el cual se comienza al seleccionar y dar click en la opción de

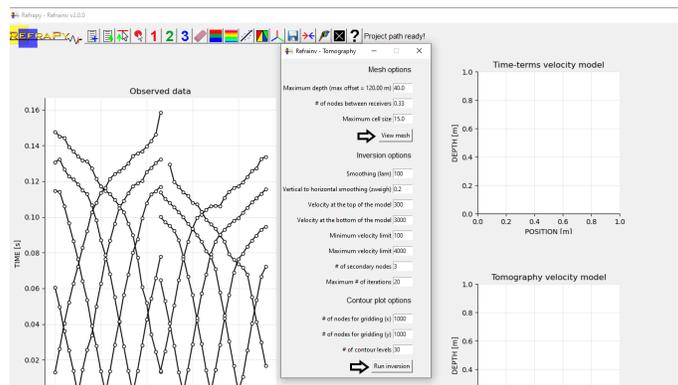


Figura 7.20: Comienzo de inversión

Una vez que se acaba el proceso de inversión se obtiene un modelo de velocidades calculado con los primeros

arribos que ya se seleccionaron previamente y están incluidos en el archivo **.sgt**

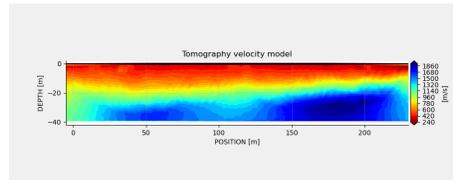


Figura 7.21: Modelo obtenido

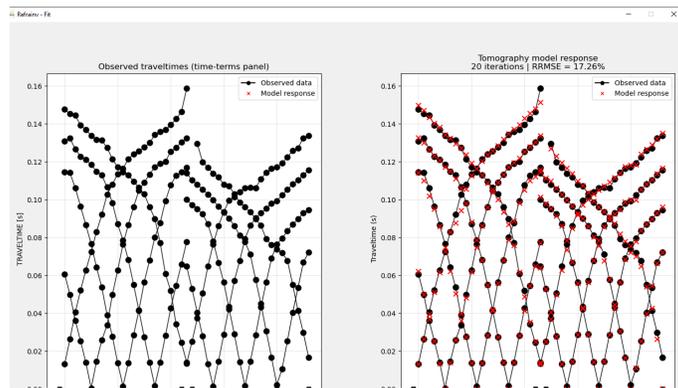


Figura 7.22: Resultados de la inversión

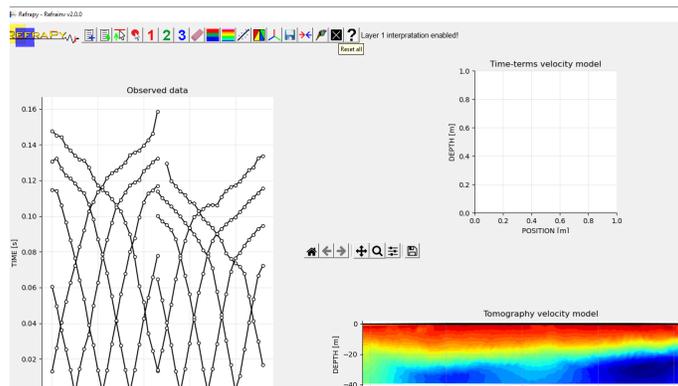


Figura 7.23: Pantalla principal después de la inversión

Una vez que se tiene el modelo correspondiente se van a guardar los resultados correspondientes seleccionando el ícono correspondiente en la barra superior como se puede observar en la siguiente figura.

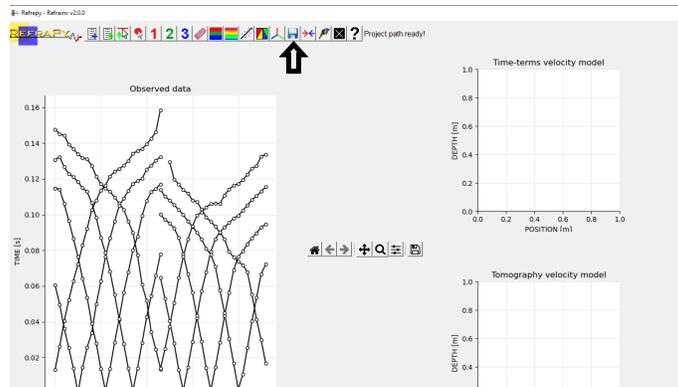


Figura 7.24: Selección de ícono de guardado

A lo cual se nos va a mostrar una pantalla como la que se visualiza la ruta en la que es guardado la cual corresponde a la zona de **models** de la carpeta que se seleccionó como la principal del proyecti como se ve en la parte de abajo.

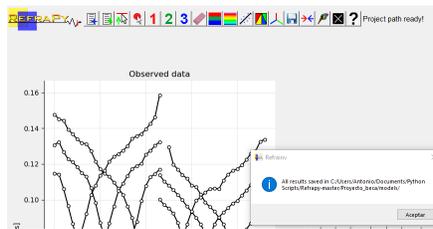
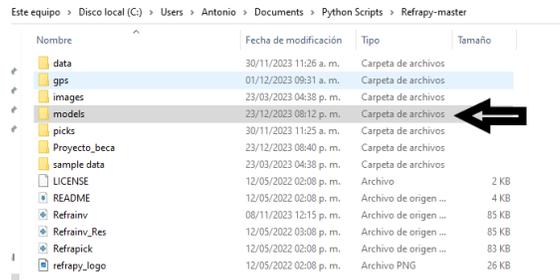
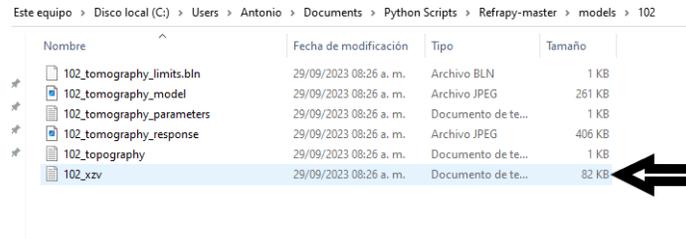


Figura 7.25: Ruta de guardado modelos

Ahora vamos al explorador de archivos de Windows y a la ruta correspondiente en la cual veremos los archivos que son proporcionados.



(a) Espaciado de los geófonos



(b) Ubicación del primer geófono

Figura 7.26: Visualización de los resultados de inversión

En los resultados que se guardan tenemos la imagen del modelo de velocidades y profundidad, la imagen de comparación de los picados respecto a los calculados, los límites en los que puede graficar lo cual se indica en el mallado, sin embargo lo más importante es el archivo con extensión **.txt** en el cual tenemos las velocidades (v), la profundidad (z) y la distancia (x), el cual se ve de la siguiente manera.

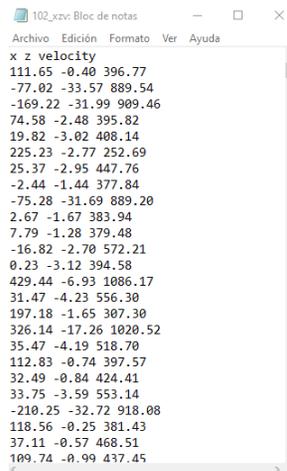
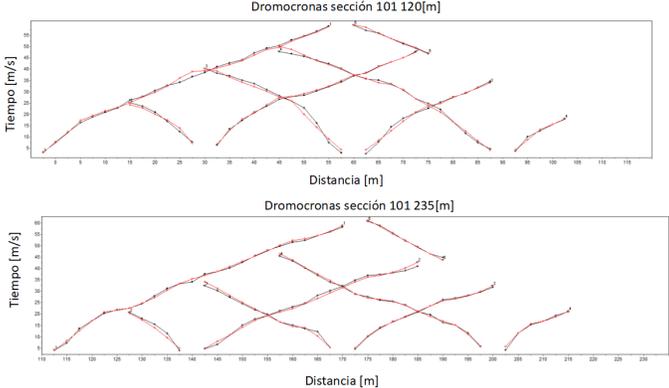


Figura 7.27: Ejemplo de resultados de la inversión

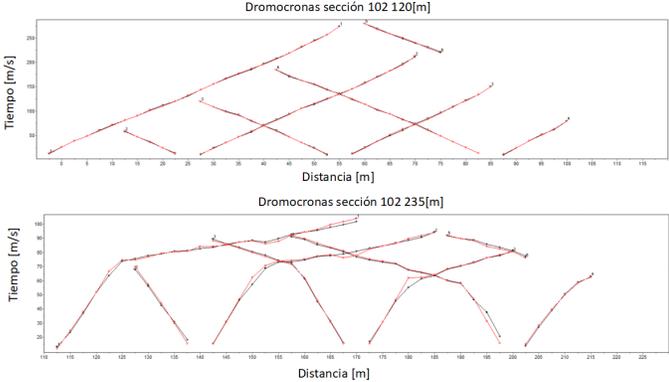
Con los resultados ya obtenidos vamos a poder hacer una mejor imagen en el software (Surfer,2014)[51] lo cual se va a ver en la siguiente sección. *Nota: No se tiene que hacer precisamente con este programa, sin embargo para este proyecto se hizo por la practicidad y la familiaridad con el software.

7.3 Dromocronas



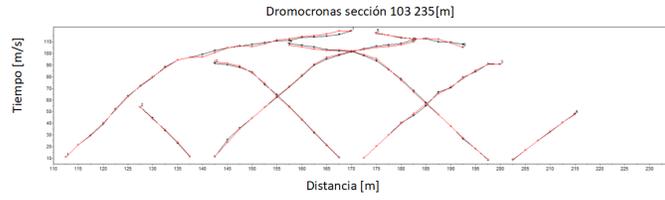
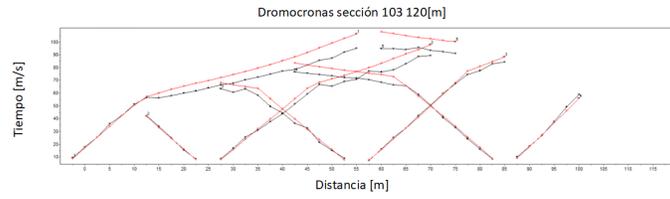
(a) Dromocronas Sección 101

Figura 7.28: Dromocronas de sección 101



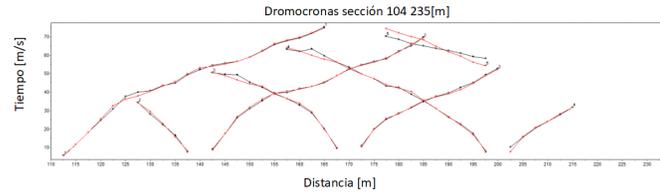
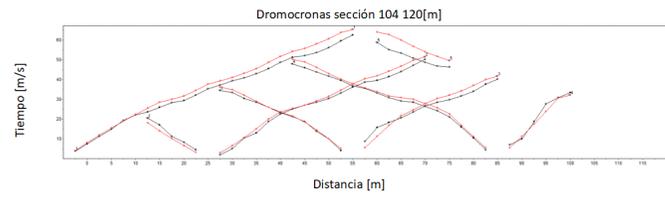
(a) Dromocronas Sección 102

Figura 7.29: Dromocronas de sección 102

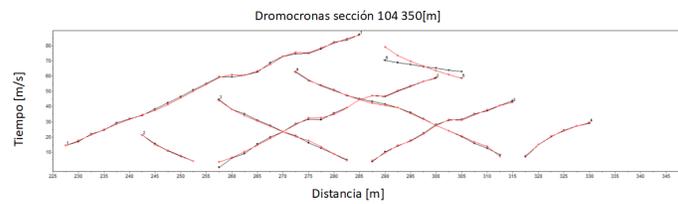


(a) Dromocronas Sección 103

Figura 7.30: Dromocronas de sección 103

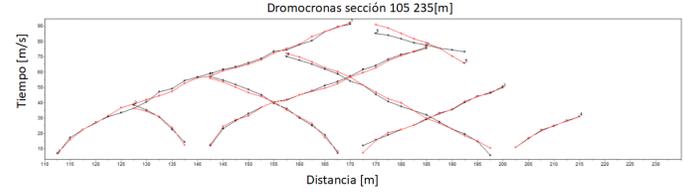
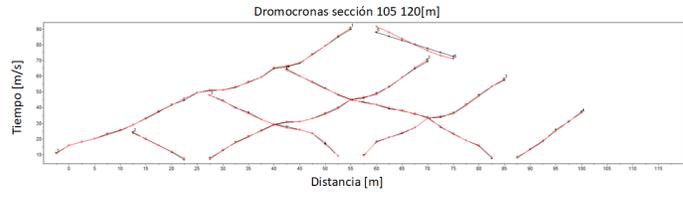


(a) Dromocronas Sección 104

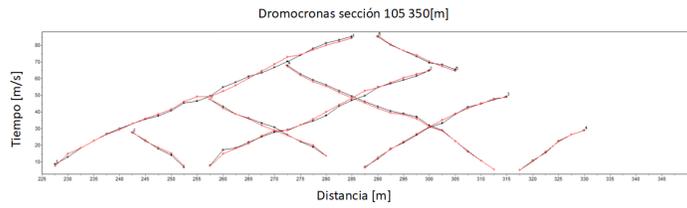


(b) Dromocronas Sección 104

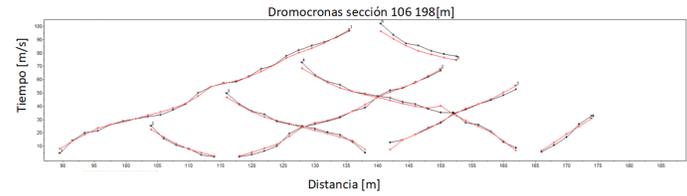
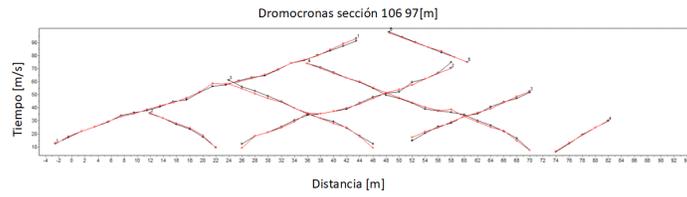
Figura 7.31: Dromocronas de sección 104



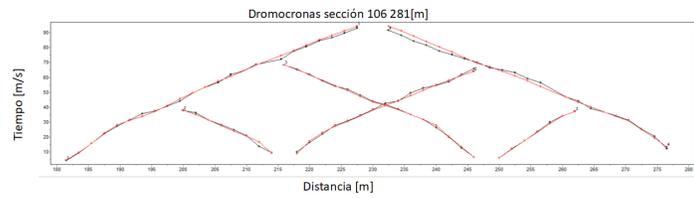
(a) Dromocronas Sección 105



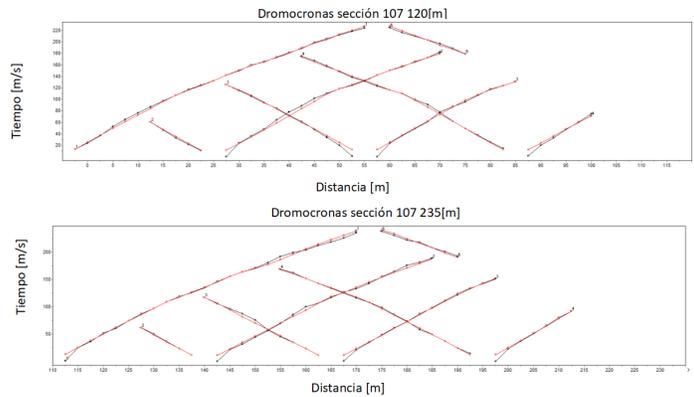
(b) Dromocronas Sección 105



(c) Dromocronas Sección 106 97 m

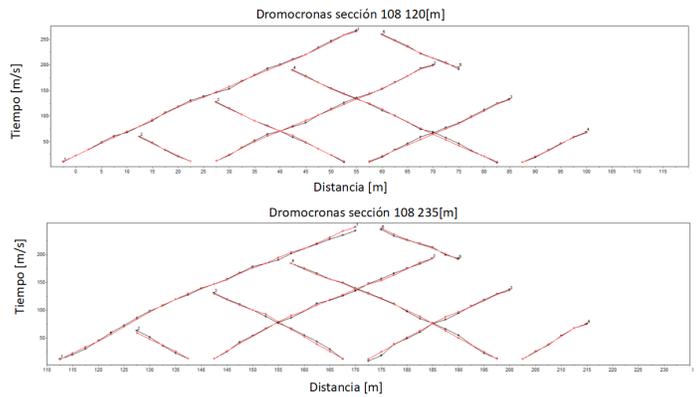


(d) Dromocronas Sección 106 198 m



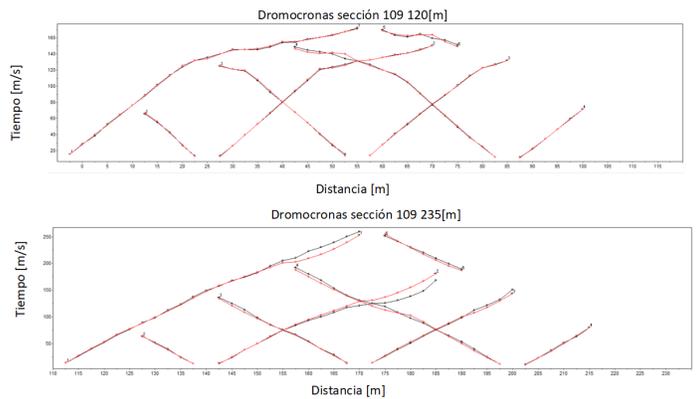
(e) Dromocronas Sección 107

Figura 7.32: Dromocronas de la sección 107



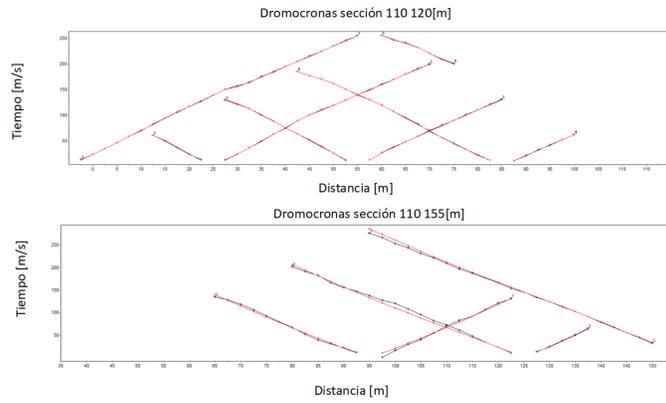
(a) Dromocronas Sección 108

Figura 7.33: Dromocronas de la sección 108



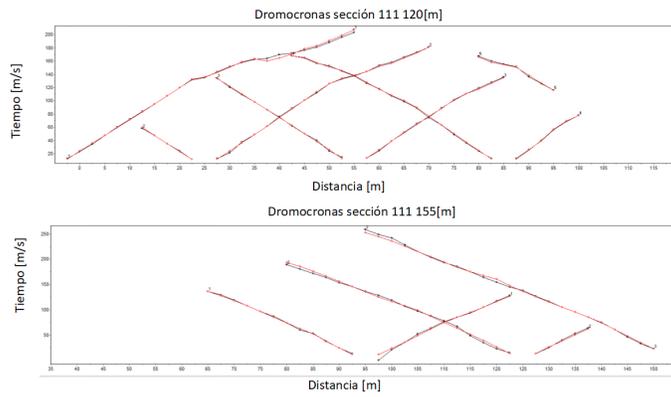
(a) Dromocronas Sección 109

Figura 7.34: Dromocronas de la sección 109



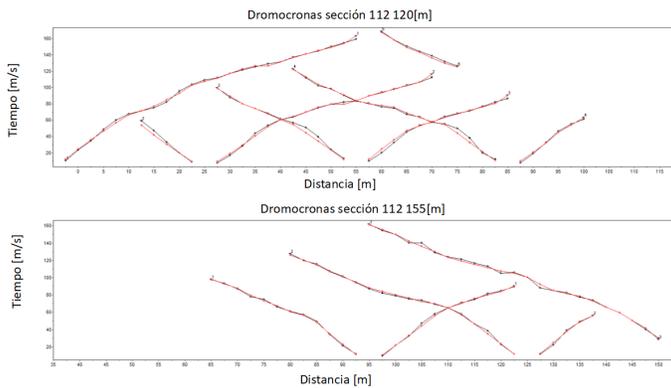
(a) Dromocronas Sección 110

Figura 7.35: Dromocronas de la sección 110



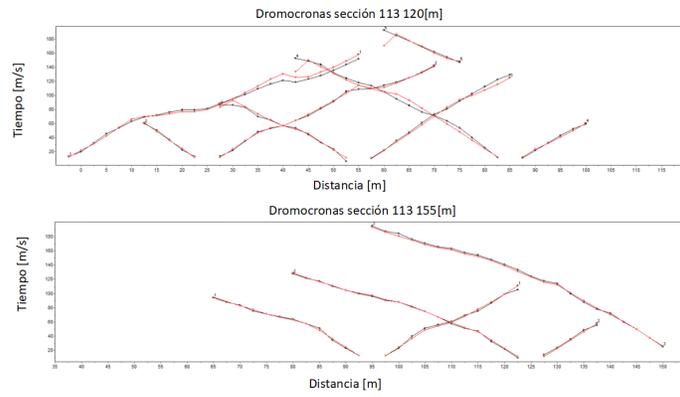
(a) Dromocronas Sección 111

Figura 7.36: Dromocronas de la sección 111



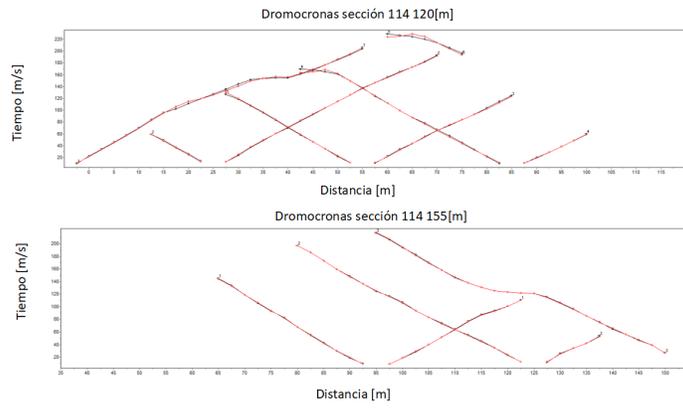
(a) Dromocronas Sección 112

Figura 7.37: Dromocronas de la sección 112

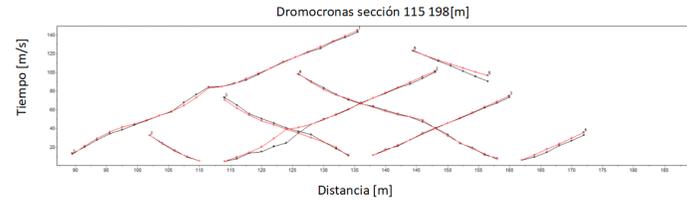
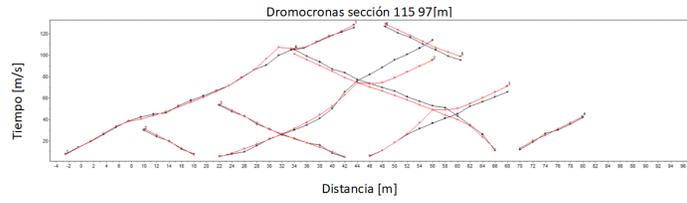


(a) Dromocronas Sección 113 120 m

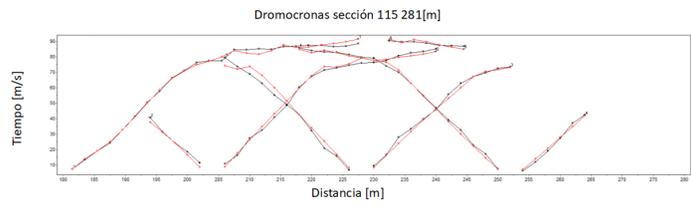
Figura 7.38: Dromocronas de la sección 113



(a) Dromocronas Sección 114

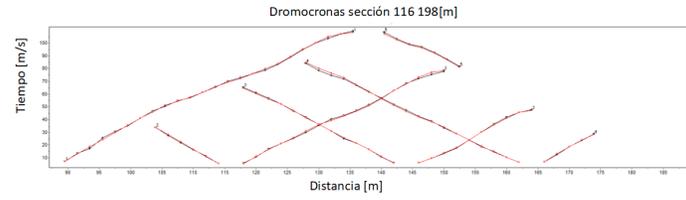
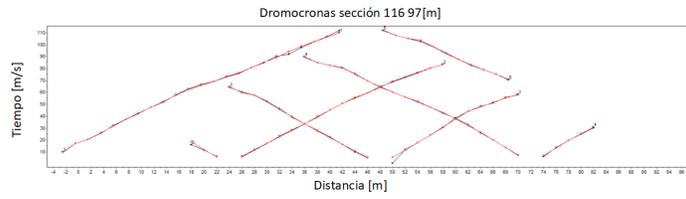


(b) Dromocronas Sección 115

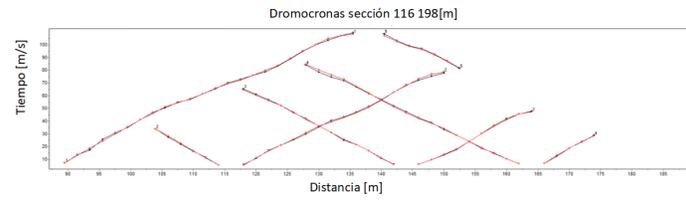
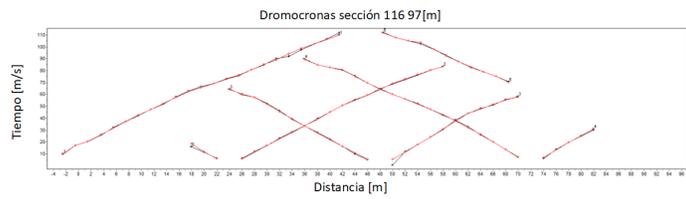


(c) Dromocronas Sección 115

Figura 7.39: Dromocronas de la sección 115



(a) Dromocronas Sección 116



(b) Dromocronas Sección 116

Figura 7.40: Dromocronas de la sección 116

7.4 Resultados de Refracción sísmica

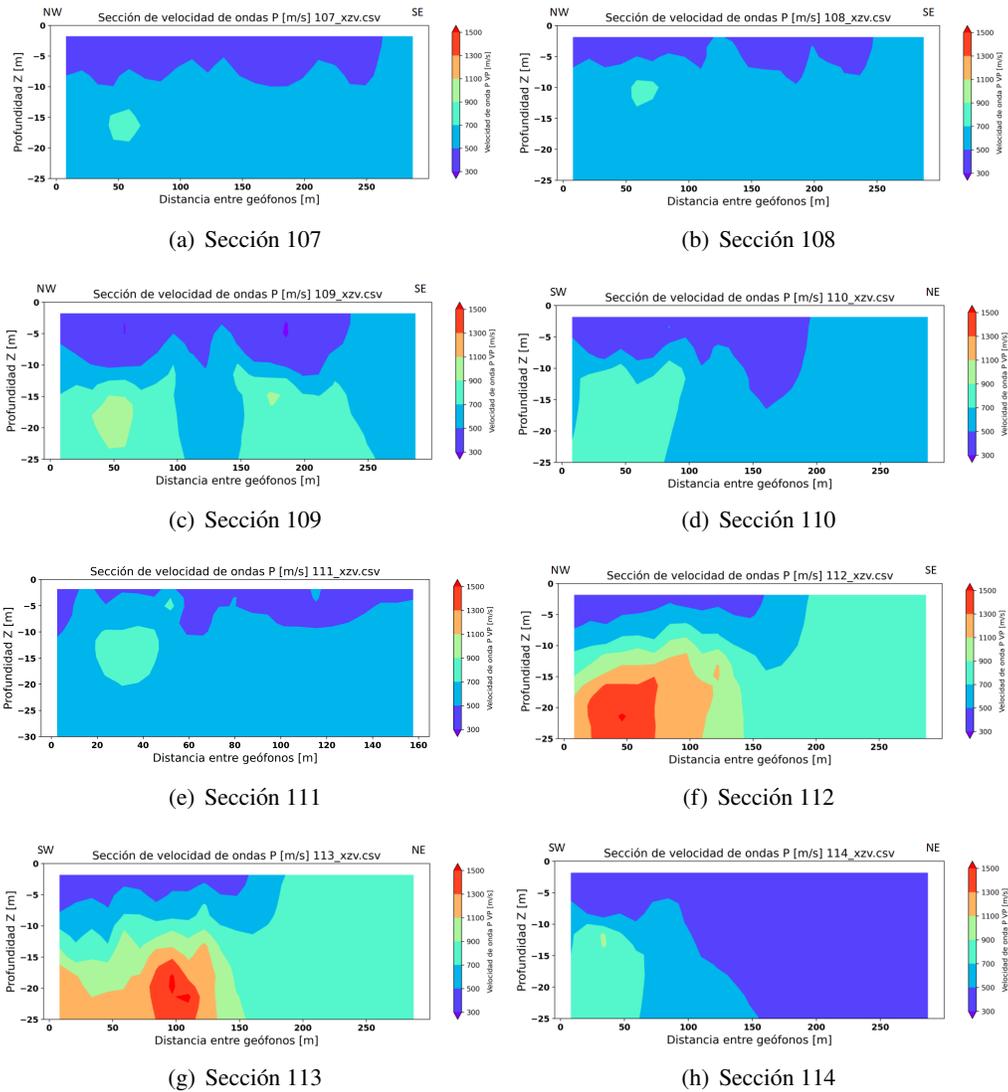


Figura 7.41: Resultado de Refracción sísmica para la parte superior de la presa de jales con software libre

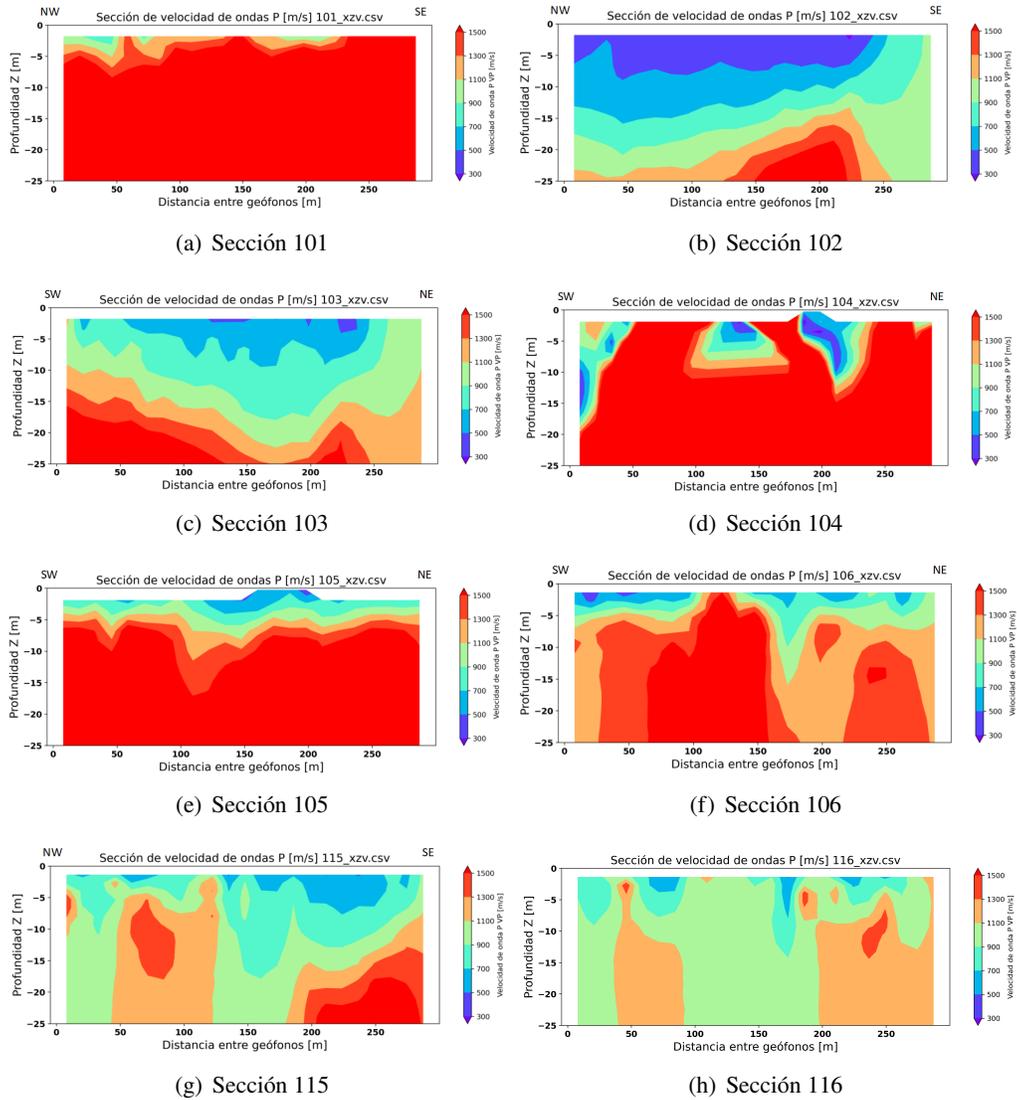


Figura 7.42: Resultado de Refracción sísmica para la parte inferior de la presa de jales con software libre

7.5 MASW

En esta sección que corresponde al procedimiento de análisis de ondas superficiales (MASW) para el cual se usa el software **ZOND2D** en su versión de prueba, la cual dura solo 20 minutos previo a que se cierre, es por ello que se realiza el siguiente procedimiento.

Lo primero es abrir el programa, como se muestra a continuación.

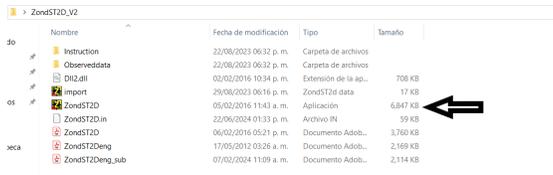


Figura 7.43: Ejecución programa ZOND2D

En el cual tenemos una pantalla principal la cual nos da una serie de opciones, sin embargo la que nos compete es entrar al módulo de picado.



(a) Pantalla principal ZOND2D

(b) Modo picado ZOND2D

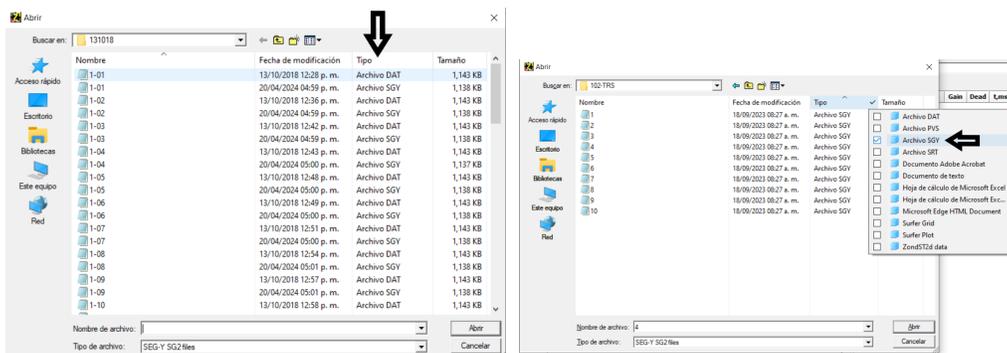
Figura 7.44: Secuencia modo picado

Una vez que ingresamos al modo de picado se va a desplegar una interfaz totalmente diferente en la cual tenemos que abrir los archivos con extensión **.sgy** que de antemano ya se modificó geometría y tenemos seguro que está bien.



(a) Interfaz modo picado

(b) Ícono cargado de datos



(c) Filtrado de archivos

(d) Selección .sgy

Figura 7.45: Secuencia Apertura de datos

Donde cada archivo corresponde a una fuente DAT y con esto lo que se hizo fue que se seleccionaron los primeros archivos para el ejemplo que vemos se tomaron 1,2,3,4 y 6, posteriormente se tomaron 5,7,8,9 y 10 depen-

diendo de la geometría que se tuviera y de la ubicación de las fuentes. Esto debido al límite de tiempo que tiene el programa.

A continuación lo que se va a mostrar es la página principal con los datos que se cargaron y la tabla con el arreglo para cada fuente.

N	V	Rx	Rz	Gain	Dead	t.ms
1	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	1	<input type="checkbox"/>	*
2	<input checked="" type="checkbox"/>	5	0	1	<input type="checkbox"/>	*
3	<input checked="" type="checkbox"/>	10	0	1	<input type="checkbox"/>	*
4	<input checked="" type="checkbox"/>	15	0	1	<input type="checkbox"/>	*
5	<input checked="" type="checkbox"/>	20	0	1	<input type="checkbox"/>	*
6	<input checked="" type="checkbox"/>	25	0	1	<input type="checkbox"/>	*
7	<input checked="" type="checkbox"/>	30	0	1	<input type="checkbox"/>	*
8	<input checked="" type="checkbox"/>	35	0	1	<input type="checkbox"/>	*
9	<input checked="" type="checkbox"/>	40	0	1	<input type="checkbox"/>	*
10	<input checked="" type="checkbox"/>	45	0	1	<input type="checkbox"/>	*
11	<input checked="" type="checkbox"/>	50	0	1	<input type="checkbox"/>	*
12	<input checked="" type="checkbox"/>	55	0	1	<input type="checkbox"/>	*
13	<input checked="" type="checkbox"/>	60	0	1	<input type="checkbox"/>	*
14	<input checked="" type="checkbox"/>	65	0	1	<input type="checkbox"/>	*
15	<input checked="" type="checkbox"/>	70	0	1	<input type="checkbox"/>	*
16	<input checked="" type="checkbox"/>	75	0	1	<input type="checkbox"/>	*
17	<input checked="" type="checkbox"/>	80	0	1	<input type="checkbox"/>	*
18	<input checked="" type="checkbox"/>	85	0	1	<input type="checkbox"/>	*
19	<input checked="" type="checkbox"/>	90	0	1	<input type="checkbox"/>	*
20	<input checked="" type="checkbox"/>	95	0	1	<input type="checkbox"/>	*
21	<input checked="" type="checkbox"/>	100	0	1	<input type="checkbox"/>	*
22	<input checked="" type="checkbox"/>	105	0	1	<input type="checkbox"/>	*
23	<input checked="" type="checkbox"/>	110	0	1	<input type="checkbox"/>	*
24	<input checked="" type="checkbox"/>	115	0	1	<input type="checkbox"/>	*

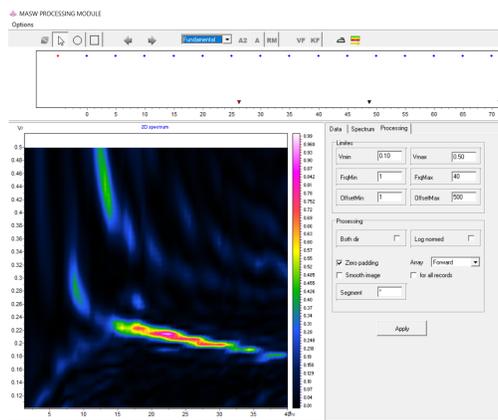
Figura 7.46: Tabla de geometría

Una vez que ya revisamos nuestros archivos vamos a entrar al módulo de MASW el cual nos va a permitir tener las curvas de dispersión y picar estas mismas curvas de inicio a fin.



(a) Ventana de comandos

(b) Ícono y selección MASW



(c) Interfaz MASW

Figura 7.47: Secuencia Apertura de módulo MASW

Una vez abierto el módulo MASW se pueden modificar ciertos parámetros donde los principales y los que se llegan a modificar más son los siguientes:

- Velocidad Mínima
- Velocidad Máxima
- Frecuencia Máxima
- Frecuencia Mínima
- Arreglo

Los cuales se pueden ver en la siguiente figura

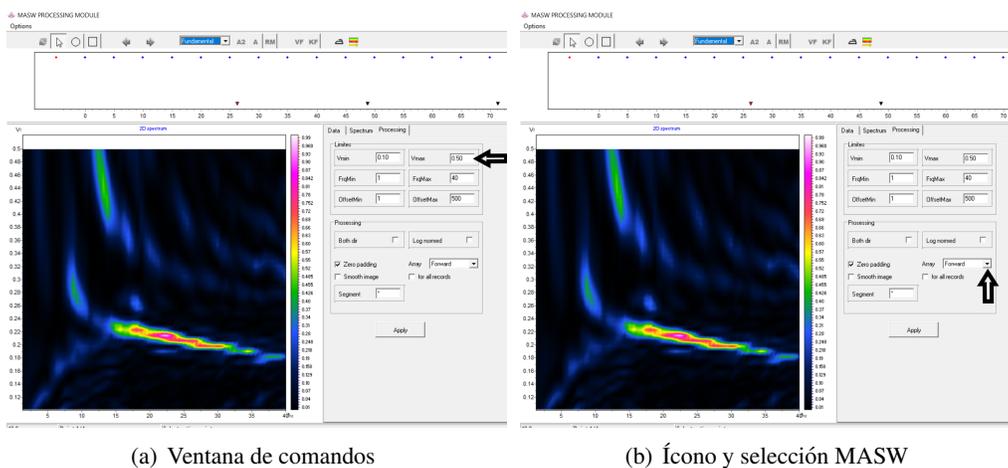


Figura 7.48: Parámetros para curvas de dispersión

Ahora podemos ver la calidad de los datos para obtener una curva de dispersión que satisfaga lo que queremos obtener para lo que vamos a ir a la ventana que lleva por nombre **Data** la cual nos permite ver la respuesta de todos los geófonos para esa fuente para seleccionar la parte que nos interesa en este caso las ondas superficiales del registro.

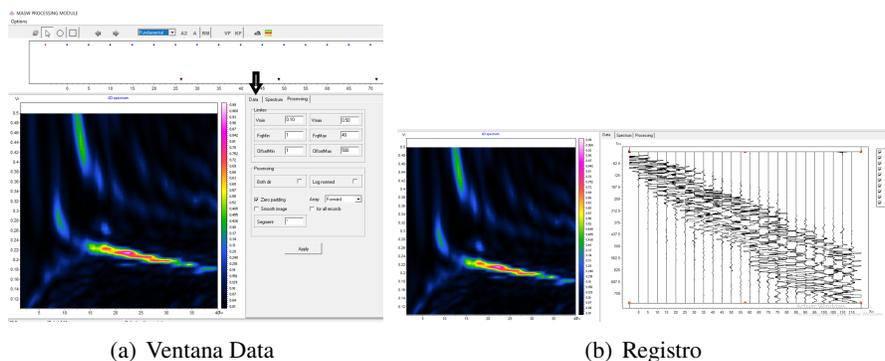


Figura 7.49: Visualización de registro para curva de dispersión

En la figura 47 tenemos el ejemplo de como es que se ven los registros, aquí se selecciona solo la parte de las ondas superficiales y en la parte derecha de la 47b se pueden quitar señales de algunos geófonos si así se considera pertinente para obtener una mejor curva de dispersión.

Un ejemplo de esto se ve a continuación

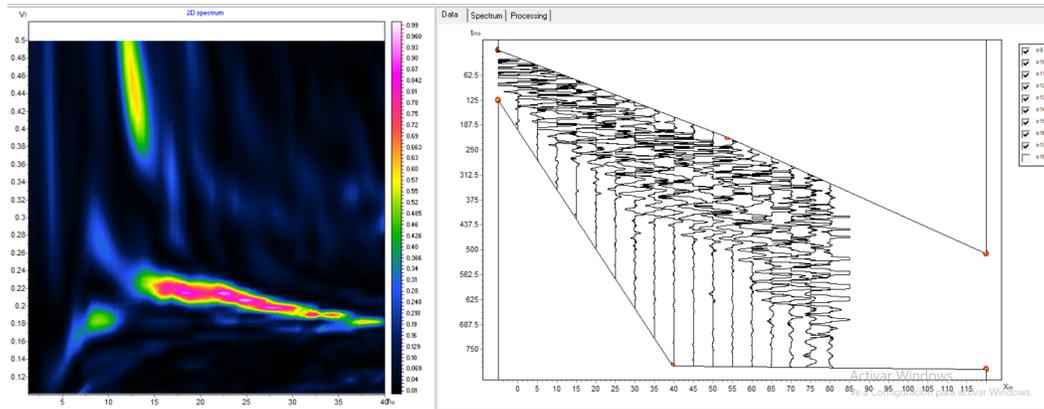
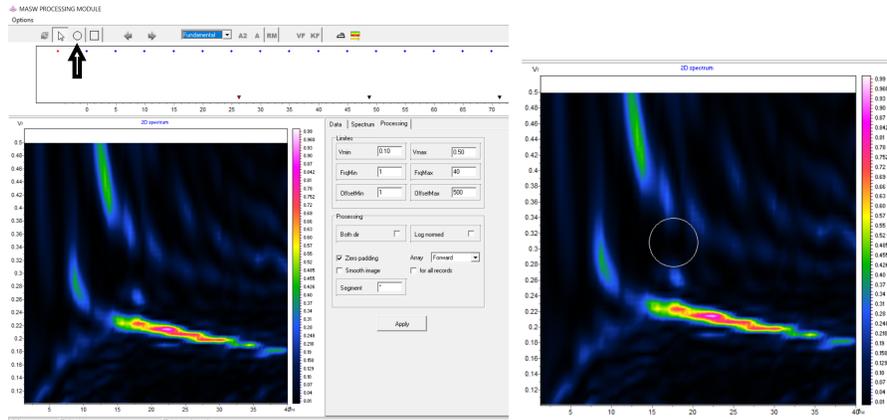


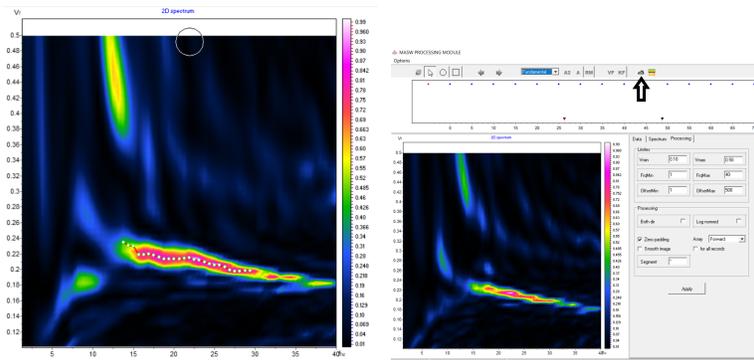
Figura 7.50: Selección de datos para curva de dispersión

Una vez que estamos conformes con este proceso se tiene que picar es decir seleccionar puntos de esta curva para que se note la tendencia en una curva, primero hay que seleccionar el modo picado con círculo que se mostrará a continuación.



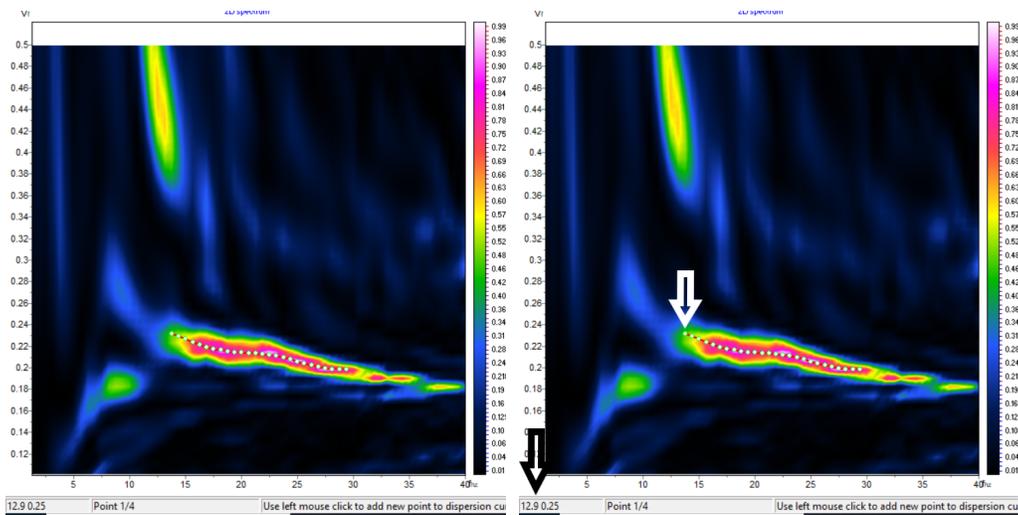
(a) Picado forma circular

(b) Curva de dispersión



(c) Curva de dispersión picada

(d) Ícono de suavizado del picado



(e) Curva de dispersión picada

(f) Datos y frecuencia de la curva de dispersión

Figura 7.51: Secuencia de curva de dispersión

Una vez que ya tenemos el picado, la frecuencia, velocidad (Figura 49f) vamos a entrar al modo de inversión

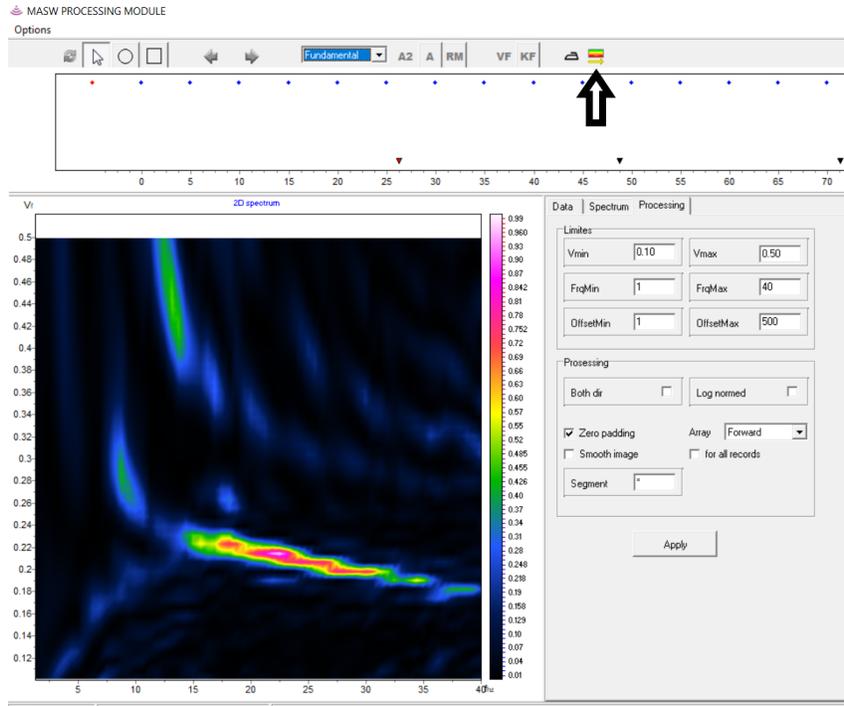


Figura 7.52: Ícono de módulo de inversión

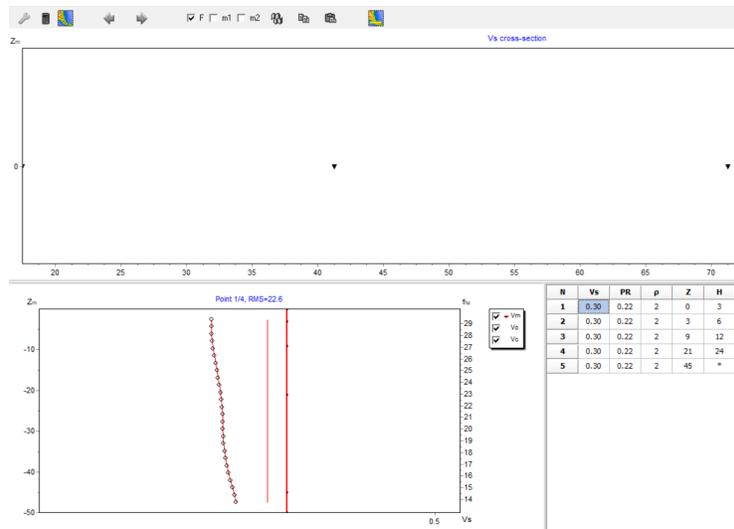


Figura 7.53: Pantalla principal de módulo de inversión

En este módulo tenemos una serie de cosas a considerar, la primera es el modelo inicial para la inversión en el cual es importante considerar la frecuencia y velocidad máxima (Figura 49f) con la cual vamos a poder calcular la profundidad máxima (z) no sin antes la longitud de onda máxima (λ_{max})

$$\lambda_{max} = \frac{frec_{max}}{vel_{max}}$$

Ahora que tenemos la longitud máxima se puede obtener la profundidad máxima que se calcula como:

$$z = \frac{\lambda_{max}}{3}$$

Esto nos permitirá modificar el factor de espesor (**thickness facotr**) en el modelo inicial el cual dependiendo de las capas que nosotros le demos al modelo inicial se va a modificar para que terminemos teniendo el espesor deseado de lo cual se van a presentar ejemplos a continuación.

Primero veamos el ícono del modelo inicial

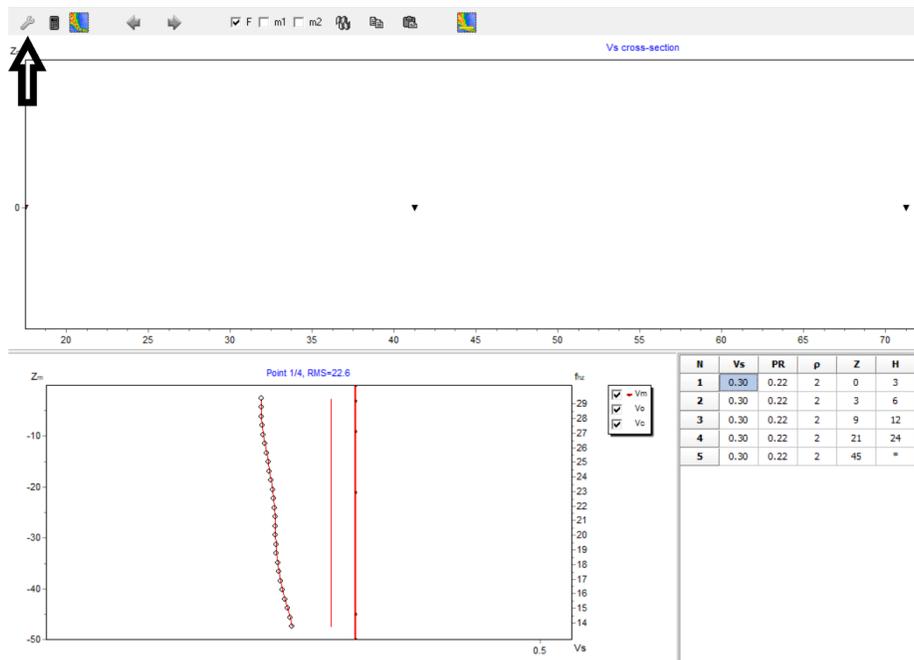
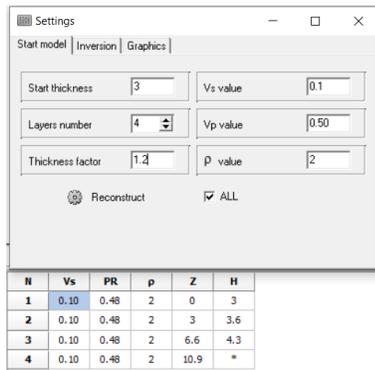
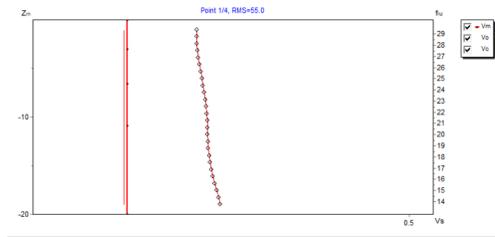


Figura 7.54: Ícono de modelo inicial

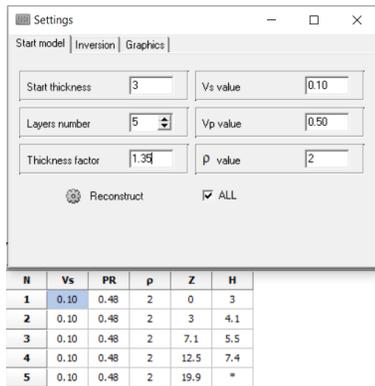
Ahora veamos como se modifica



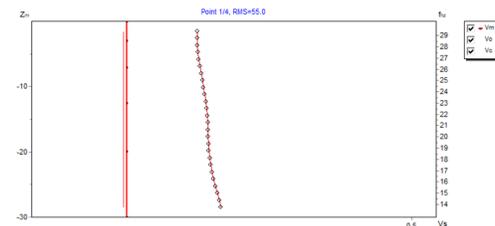
(a) Ejemplo parámetros modelo inicial



(b) Ejemplo de modelo de inversión



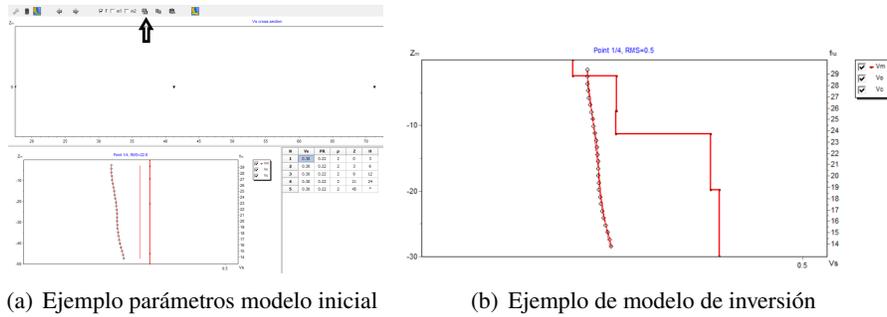
(c) Parámetros modelo inicial



(d) Modelo sin invertir

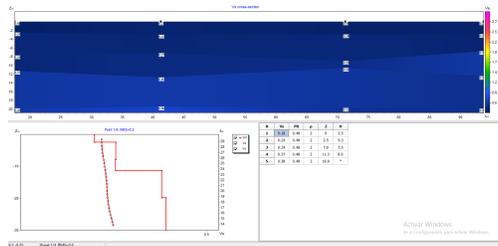
Figura 7.55: Secuencia de modelo inicial

Lo que sigue es hacer la inversión para esta curva de dispersión.



(a) Ejemplo parámetros modelo inicial

(b) Ejemplo de modelo de inversión



(c) Parámetros modelo inicial

Figura 7.56: Secuencia de inversión

***Nota:** Es importante mencionar que este es el proceso para una sola fuente, en este ejemplo se tomaron cuatro fuentes por lo que se hizo lo mismo para todas las demás fuentes.

Una vez que ya se realizó la inversión de todas las demás fuentes que se cargaron al principio para obtener una sección como la que se muestra en la siguiente imagen.

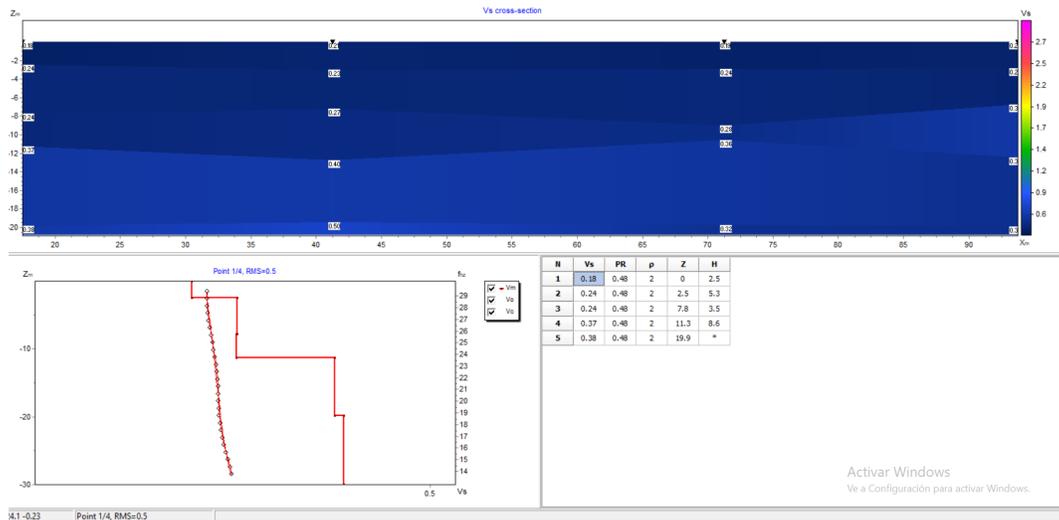


Figura 7.57: Ejemplo de sección obtenida en ZOND

Lo que sigue a continuación es fundamental ya que al solo tener veinte minutos para hacer esto se tienen que guardar los resultados lo cual se hace con la siguiente secuencia.

Vamos a seleccionar el menú de options, buscamos el apartado de export y por último report to excel como se ve en la siguiente figura.

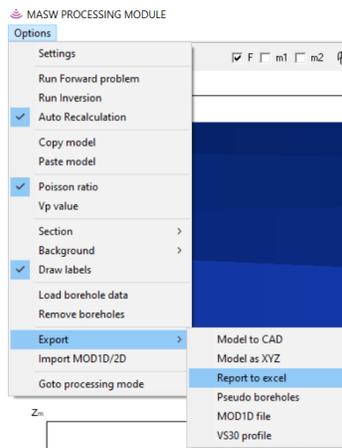


Figura 7.58: Menú para exportar archivo

Por supuesto se va a abrir un explorador de archivos en el cual vamos a seleccionar la ruta de guardado y el nombre del archivo que será guardado

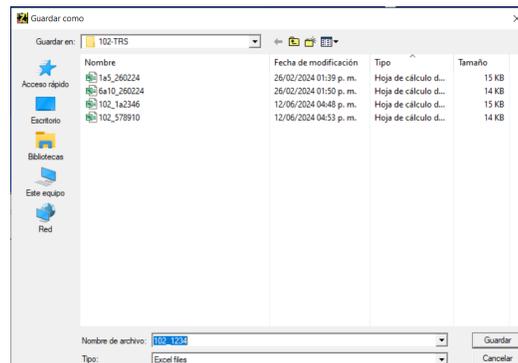
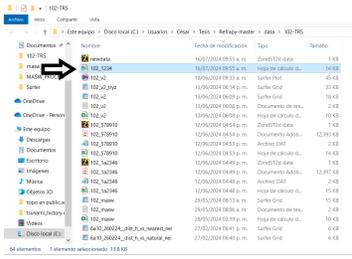


Figura 7.59: Menú para exportar archivo

En la siguiente figura se muestra el procedimiento para abrir el archivo y modificarlo hasta obtener un archivo que nos permita crear la sección que será mostrada en el apartado de resultados.



(a) Apertura archivo



(b) Advertencia de archivo

Station #1:	Vs	Vp	rho	H	Z
Distance:	17.5				
err%	0.5				
#	frequency	Mode	Va_o	Va_c	
1	13.8	1	0.231	0.231	
2	14.4	1	0.229	0.228	
3	15	1	0.227	0.226	
4	15.6	1	0.224	0.224	
5	16.3	1	0.221	0.222	
6	16.9	1	0.219	0.221	
7	17.5	1	0.218	0.219	
8	18.1	1	0.216	0.218	
9	18.8	1	0.215	0.217	
10	19.4	1	0.214	0.216	
11	20	1	0.214	0.214	
12	20.6	1	0.214	0.213	
13	21.3	1	0.213	0.212	
14	21.9	1	0.213	0.211	
15	22.5	1	0.212	0.21	
16	23.1	1	0.211	0.209	
17	23.8	1	0.209	0.208	
18	24.4	1	0.208	0.207	
19	25	1	0.206	0.206	

(c) Primera parte del archivo

32	#						
33	1	0.178	0.905	2	2.476	0	
34	2	0.239	1.219	2	5.304	2.476	
35	3	0.238	1.214	2	3.518	7.78	
36	4	0.371	1.894	2	8.563	11.298	
37	5	0.383	1.954	2		19.861	

(d) Segunda parte del archivo

Figura 7.60: Secuencia de inversión

En la figura de arriba se puede ver que hay dos partes del archivo donde la importante es la que se encuentra en la parte inferior que se puede ver en la figura mostrada a continuación.

Station #1:	Vs	Vp	rho	H	Z
Distance:	17.5				
err%	0.5				
#	frequency	Mode	Va_o	Va_c	
1	0.178	0.905	2	2.476	0
2	0.239	1.219	2	5.304	2.476
3	0.238	1.214	2	3.518	7.78
4	0.371	1.894	2	8.563	11.298
5	0.383	1.954	2		19.861
Station #2:					
Distance:	41.25				
err%	0.2				
#	frequency	Mode	Va_o	Va_c	
1	8.8	1	0.323	0.323	
2	9.4	1	0.303	0.301	
3	10	1	0.283	0.284	
4	10.6	1	0.27	0.271	
5	11.3	1	0.261	0.261	
6	11.9	1	0.254	0.254	
7	12.5	1	0.248	0.247	
8	13.1	1	0.242	0.242	
9	13.8	1	0.238	0.238	
10	14.4	1	0.235	0.235	
#	frequency	Mode	Va_o	Va_c	
1	0.213	1.088	2	2.997	0
2	0.227	1.139	2	4.26	2.997
3	0.274	1.397	2	5.519	7.258
4	0.4	2.042	2	6.706	12.777

(a) Parte fundamental del archivo

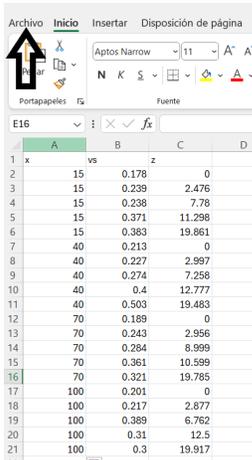
x	vs	z
15	0.178	0
15	0.239	2.476
15	0.238	7.78
15	0.371	11.298
40	0.213	0
40	0.227	2.997
40	0.274	7.258
40	0.4	12.777
40	0.503	19.483
70	0.189	0
70	0.243	2.956
70	0.284	8.999
70	0.361	10.599
70	0.321	19.785
100	0.201	0
100	0.217	2.877
100	0.389	6.762
100	0.31	12.5
100	0.3	19.917

(b) Estructura final para txt

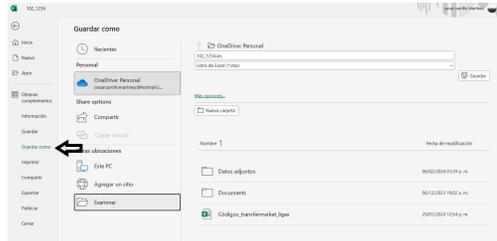
Figura 7.61: Archivo para guardar como .txt

***Nota*:** Esto se hizo para las primeras cuatro fuentes, pero dependiendo del arreglo se tiene que hacer para todas las que se tengan en el arreglo correspondiente.

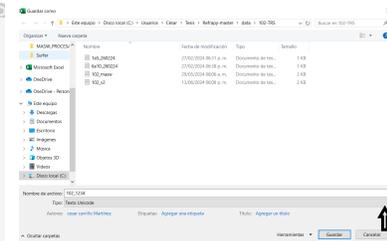
Por último se guarda este archivo como se explica en esta última secuencia de este apartado.



(a) Ícono de archivo



(b) Ícono de guardar como



(c) Selección de tipo de archivo

Figura 7.62: Archivo para guardar como .txt

7.6 Ploteo

7.6.1 Ploteo de secciones con software comercial

Lo primero que se hace es obtener una malla. En la barra de tareas hay un apartado que nos indica **Grid**, a continuación se tiene la opción de **data** en la cual se va a seleccionar el archivo **.txt** que se mencionó previamente con las velocidades, ubicación y profundidad

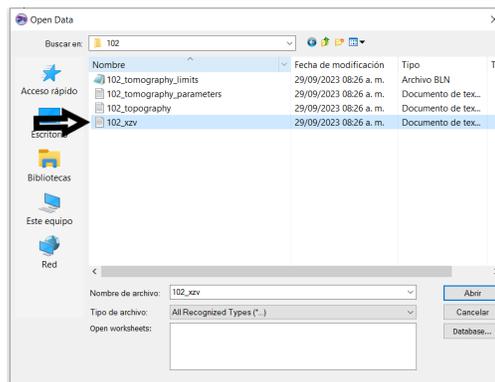


(a) Ubicación del primer geófono

Figura 7.63: Visualización de los resultados de inversión

textwidth textwidth

(a) Espaciado de los geófonos



(b) Ubicación del primer geófono

Figura 7.64: Visualización de los resultados de inversión

Una vez que ya fueron seleccionados los datos se presentará una ventana en la cual tenemos que indicar como se están importando los datos desde el archivo **.txt** usualmente se reconoce la estructura del archivo.

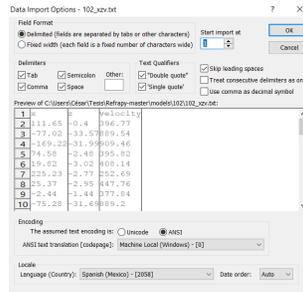
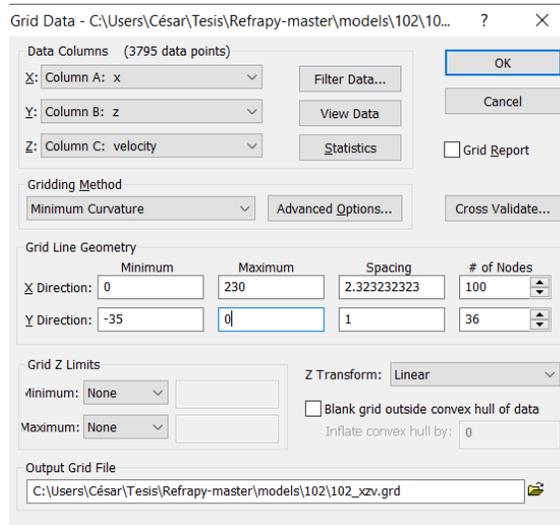


Figura 7.65: Lectura de datos

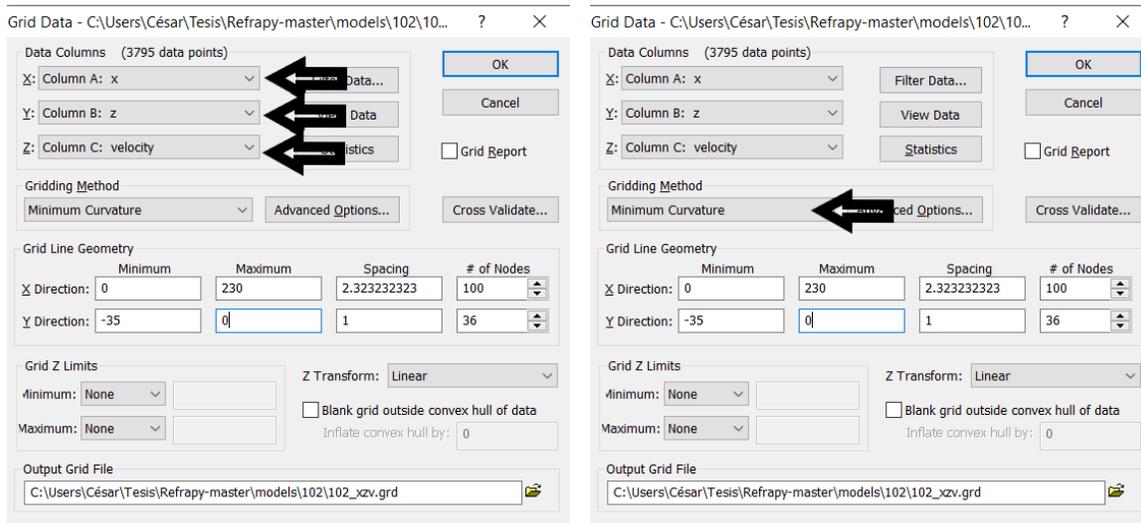
Avanzamos a la siguiente ventana emergente en la cual hay que seleccionar más cosas.

Para la siguiente figura se modifica como es que el programa va a leer los archivos, en este caso se usa x como la posición de los geófonos, y las profundidades y z las velocidades



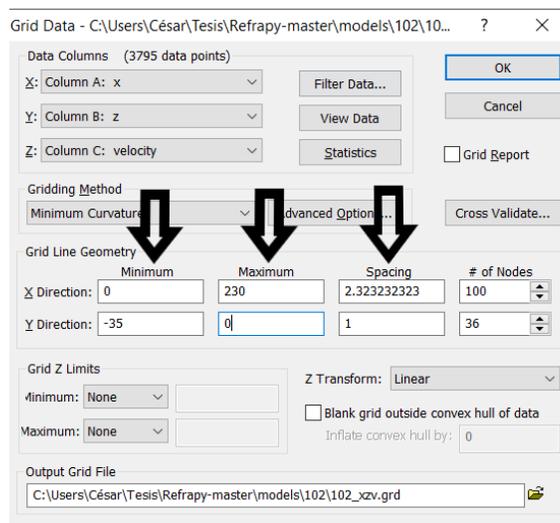
(a) Ventana de Interpolación

Figura 7.66: Ventana de Interpolación



(a) Elección de Datos

(b) Selección de método de interpolación



(c) Medidas de la interpolación

Figura 7.67: Creación de interpolación

Una vez que estamos conformes con nuestra malla creada y con los datos seleccionados vamos a visualizarlo en un mapa de contornos el cual se hace de la siguiente manera.

Vamos a ir a la barra de herramientas y buscar el ícono que se muestra en la figura



Figura 7.68: Mapa de contorno en la barra de herramientas

Este botón nos va a desplegar un administrador de archivos en el cual se van a desplegar los archivos con extensión **.grd** correspondientes a mallas creadas con Surfer.

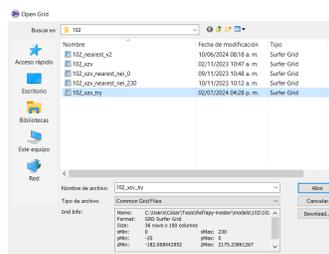
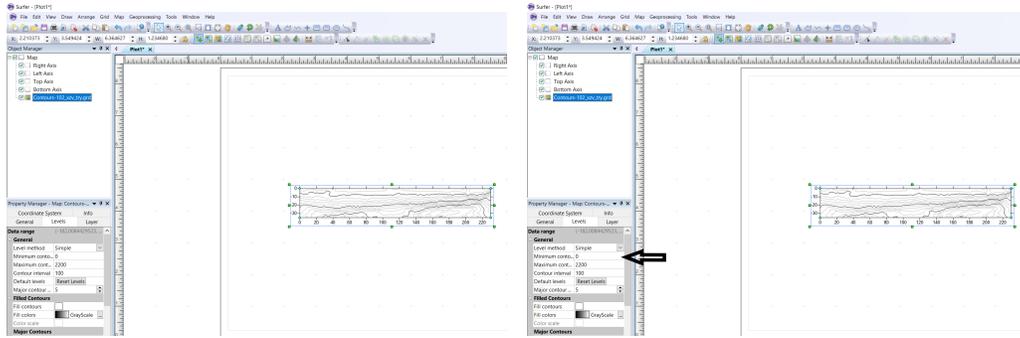


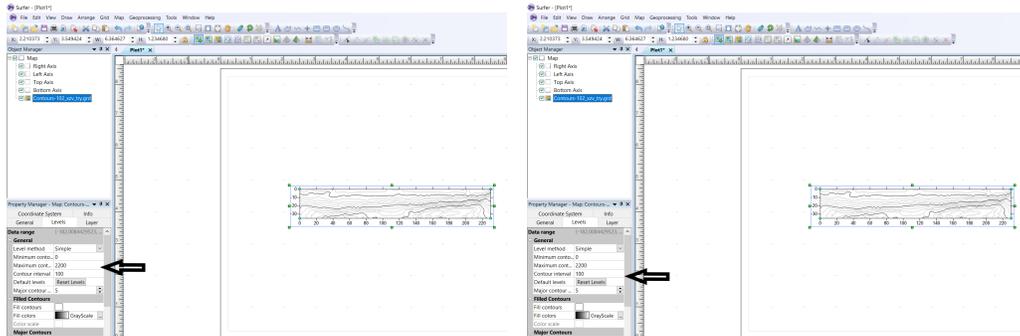
Figura 7.69: Selección de malla creada

Ahora lo que se hace es modificar las características de las velocidades así como los máximos, mínimos de la escala que será mostrada.



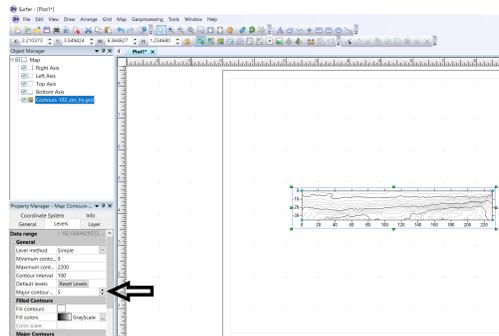
(a) Mapa mostrado

(b) Mínimo de la escala



(c) Máximo de la escala

(d) Intervalo contorno del mapa



(e) Mayor contorno

Figura 7.70: Modificar visualización de mapa y escala

Es importante precisar qué es lo que hace cada una de estas variables.

- **Mínimo de la escala:** Nos permite cambiar el límite inferior de la escala en nuestro caso usamos 100 porque no hay velocidades de 0.
- **Máximo de la escala:** Consta del límite superior de la escala el cual puede llegar a ser hasta 4000
- **Intervalo contorno del mapa:** Es lo que nos permite dar espaciamiento entre los valores mostrados en el mapa.
- **Mayor contorno:** Consta de la frecuencia con la que un contorno mayor aparezca en el mapa. Para este trabajo se usó 50 como valor.

Una vez que ya fueron establecidos estos parámetros se pueden ver seleccionando el ícono de **Fill contour** y **color scale** con los cuales se va a rellenar el mapa y aparecerá del lado derecho al mismo una escala de valores y colores como se puede ver a continuación.

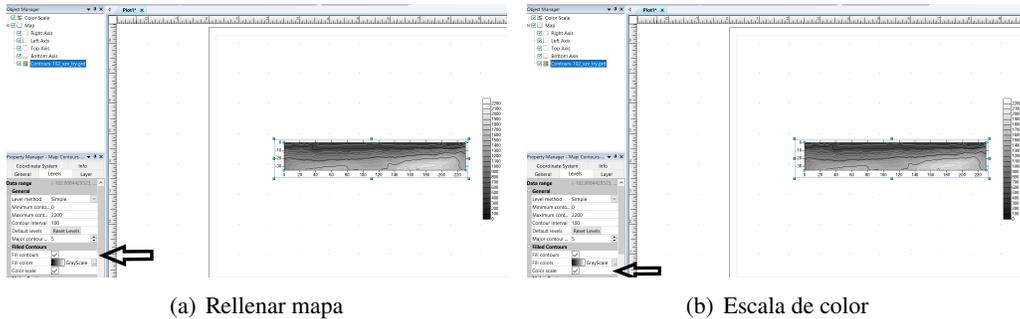


Figura 7.71: Rellenar y escala de color mapa

Ahora solo nos falta que la escala de colores sea diferente para ello se hará lo siguiente: En el apartado de **Fill colors** se selecciona la opción **rainbow** la cual es la más usada para la presentación de resultados de refracción sísmica

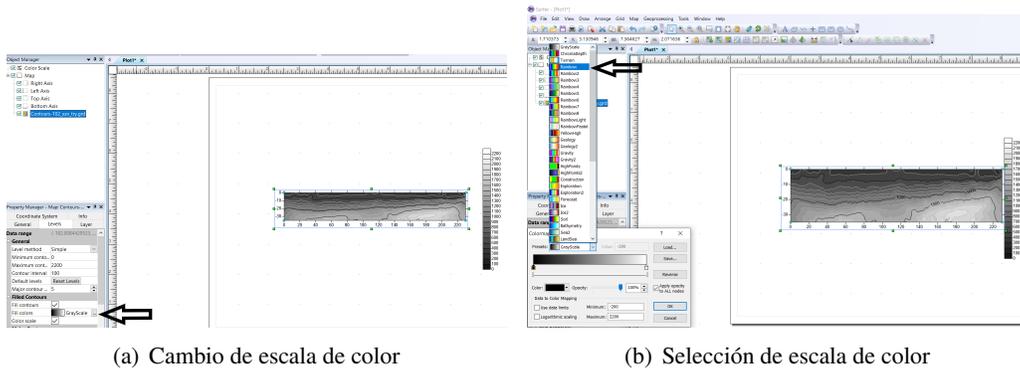
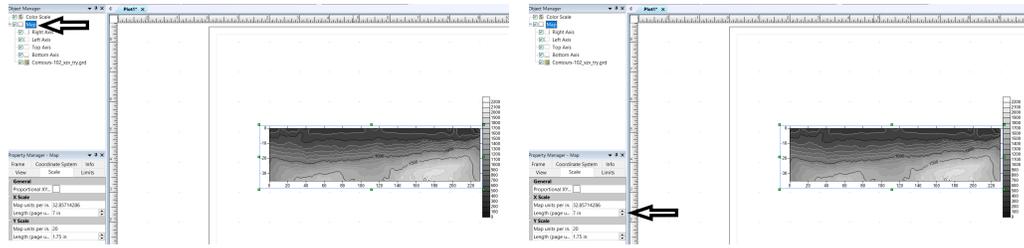


Figura 7.72: Cambio y selección de escala de color

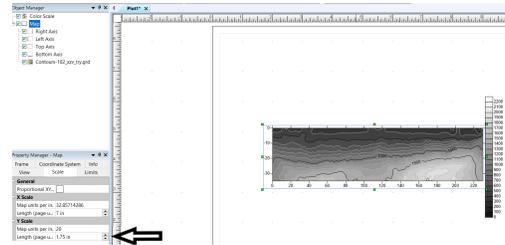
Por último en el tema de edición de la imagen lo que se hace es en la ventana de **object manager**, seleccionar la opción correspondiente a **map**, a continuación en la parte inferior a este menú se tiene **Property manager**, dentro de este menú está **Scale** en el cual vamos a modificar los tres parámetros que existen. Lo primero es quitar la señalización de que es proporcional, posteriormente el tamaño que se usó para las imágenes presentadas en el siguiente capítulo son:

- **x:** 7 [in]
- **y:** 1.75 [in]



(a) Selección de Map

(b) Modificación X

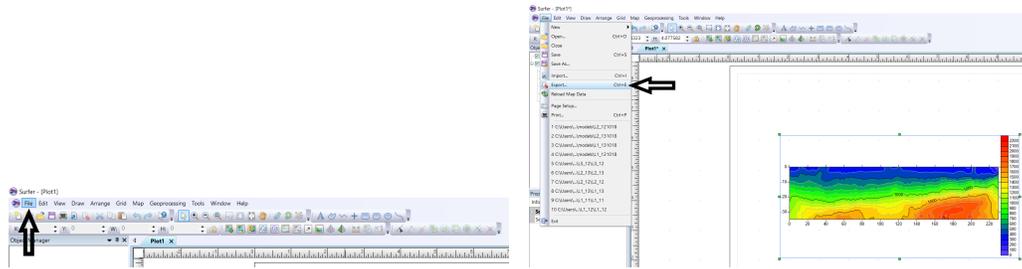


(c) Modificación Y

Figura 7.73: Modificación de tamaño de mapa

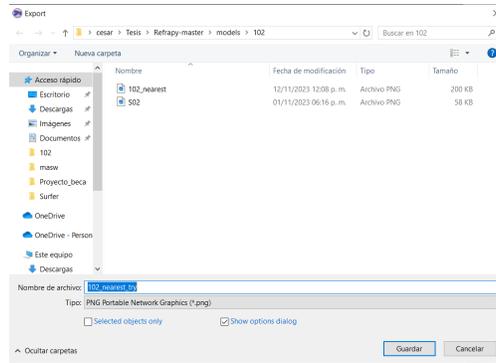
Por último vamos a guardar toda la imagen. Para esto lo que se tiene que hacer es seleccionar todos los elementos que existen en la hoja de trabajo es decir el mapa y la escala.

Una vez ya seleccionamos vamos a la barra de herramientas en la cual tenemos el menú **file** que a continuación presenta el ícono **export** o con el comando **ctrl+E** nos permite tener una imagen la cual al aparecer la ventana emergente solo seleccionamos que tipo de archivo se quiere y guardar.



(a) Menú file

(b) Ícono de exportar



(c) Explorador de archivo para guardar

Figura 7.74: Guardar mapa

7.6.2 Ploteo de secciones con script de python

Se realizó un script en el lenguaje de programación python para graficar los datos obtenidos tanto de la inversión de ondas P como de las ondas S. A continuación, se va a explicar detalladamente cómo es el proceso para que el programa funcione, así como la explicación de un par de parámetros que pueden cambiar dependiendo de lo que se esté buscando.

Una vez terminada la inversión de las curvas de dispersión, se guarda el archivo que en mi caso desarrollé como terminología para que fuera más fácil identificar, siendo la siguiente:

#deseccion parametro inicial vs parametro inicial v parametro inicial z profundidad

Siendo un ejemplo el siguiente

101₁2346_vs01_vp03_z10

donde s depende totalmente de la longitud de onda, como se explicó en la sección correspondiente.

Este archivo tiene todo el informe de la inversión correspondiente en el que lo que nos importa principalmente es la vs y el espesor z como se muestra a continuación.

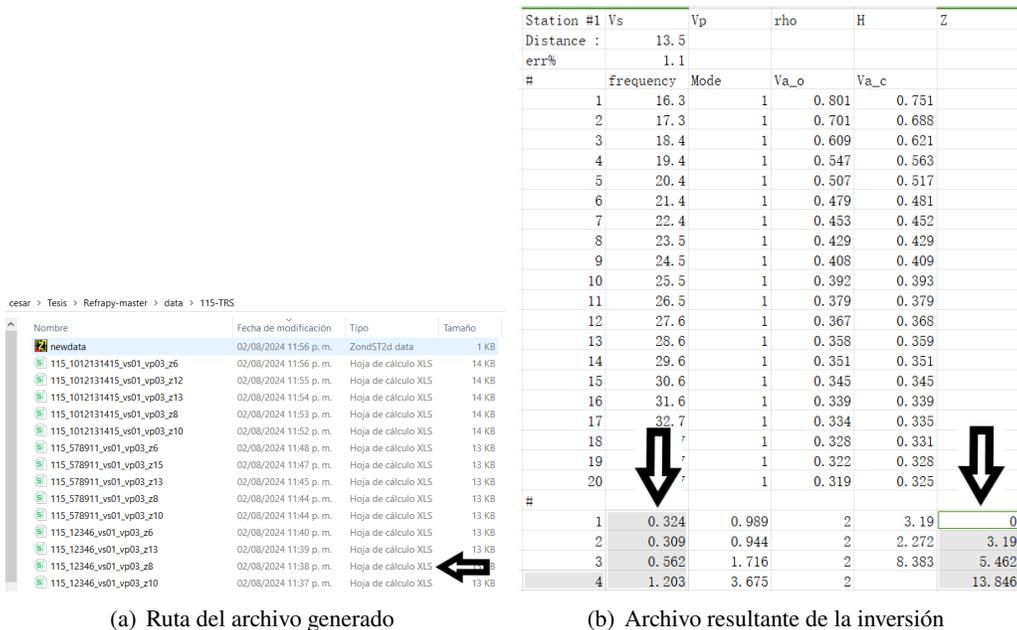


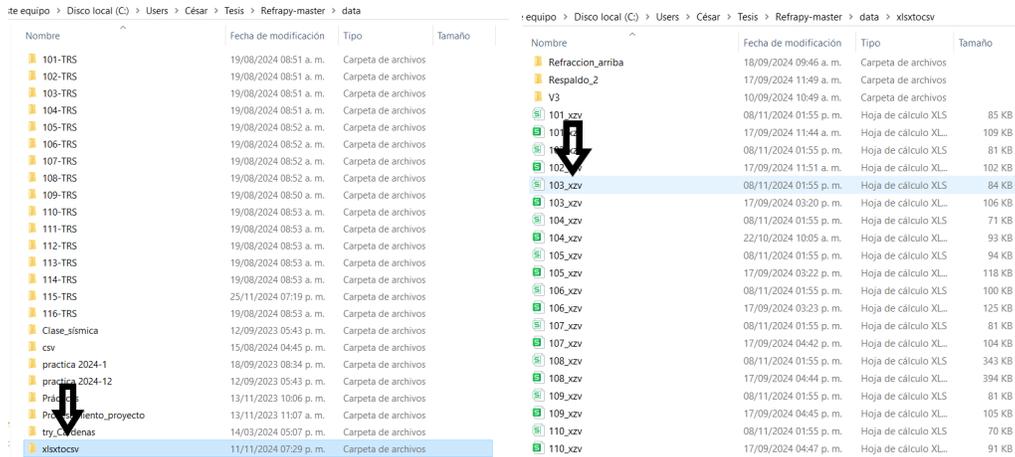
Figura 7.75: Apertura de los resultados de la inversión

A continuación se genera un nuevo archivo que consiste en tres columnas, siendo x una ubicación entre las fuentes generadas, lo cual se hace de manera manual a partir de un análisis del tendido. A continuación, en la columna z se copia y pega lo correspondiente a vs que se muestra en la figura pasada. En esta parte, es indispensable multiplicar toda la columna por 1000, ya que el programa que se usa para la inversión nos da los resultados en $[\frac{km}{s}]$ y con esta conversión lo tenemos en $[\frac{m}{s}]$; por último, en la columna y es la profundidad obtenida y es reportada como z en el archivo mostrado arriba. En esta columna es importante multiplicar todo por -1 para obtener la gráfica a profundidad.

x	z	y
12.5	324	0
12.5	309	-19
12.5	562	-462
12.5	1203	-13.846
40	246	0
40	364	-2.773
40	520	-7.224
40	763	-9.482
70	253	0
70	335	-2.973
70	506	-7.406
70	838	-10.067
97.5	410	0
97.5	324	-3.045
97.5	430	-8.064
97.5	989	-10.016
97.5	384	0
97.5	376	-3.003
97.5	636	-7.211
97.5	1041	-9.287

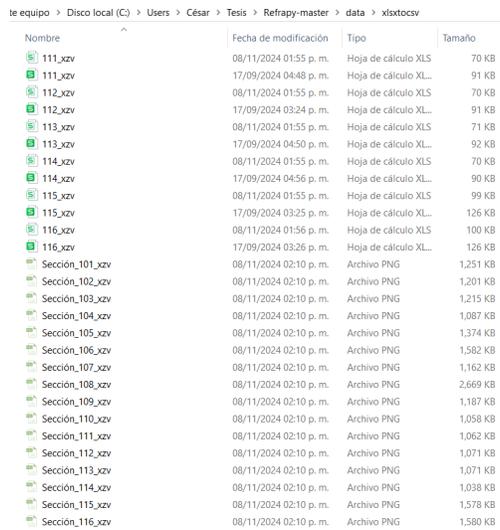
Figura 7.76: Archivo para graficar

Lo que siguió fue que es más fácil trabajar con archivos **.csv** que con **.xlsx** para lo que se hizo un programa. Lo primero que hay que hacer es ubicar todo en una misma carpeta para convertir todos los archivos en una sola ejecución, además de que aquí mismo se van a generar las gráficas cuyo procedimiento se mostrará más adelante. Otra cosa importante es que este primer archivo lleva por nombre $\#_linea_xzv$ por ejemplo 101_xzv .



(a) Carpeta creada

(b) Ejemplo del nombre de los archivos

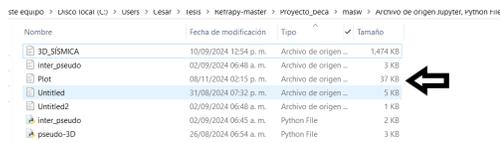


(c) Contenido de la carpeta

Figura 7.77: Apertura de los resultados de la inversión

Ahora se abre el programa que se creó lleva por nombre **plot** ubicado en una carpeta totalmente diferente en la que se muestra todo lo mostrado anteriormente, sin embargo ubicándolo en cualquier lugar no debe tener problema ya que lo importante es mostrar la ruta en la que se tienen todos los demás datos que se mostraron arriba.

Es importante mencionar que el programa se hizo en jupyter notebook por lo que se muestra así en este trabajo, sin embargo al momento de ejecutarse desde consola no debería tener ningún problema.



(a) Ubicación del archivo



(b) Archivo desde Jupyter Notebook



(c) Ruta de los archivos a convertir



(d) Finalización de ejecución

Figura 7.78: Secuencia de conversión .xlsx a .csv

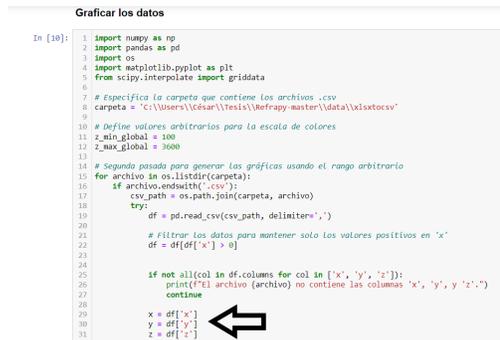
Ya que se tienen los archivos con extensión .csv se usa la siguiente parte del programa en la cual se hacen las gráficas correspondientes a estos datos, en este código lo más importante a modificar es la ruta, los parámetros mínimos y máximos, el contorno que usa, la interpolación que en mi caso fue lineal.



(a) Ruta del programa de ploteo



(b) Parámetros para la escala de colores



(c) Indicación de como es que lee los valores



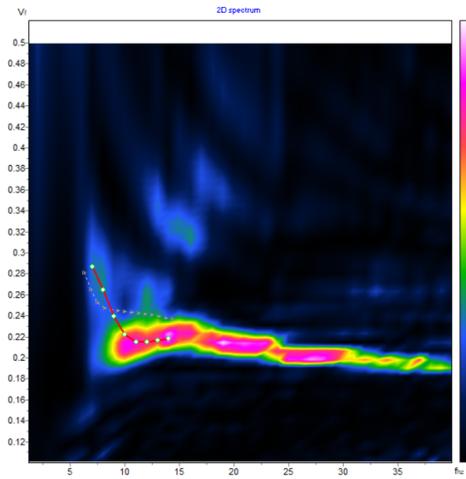
(d) Ejecución finalizada

Figura 7.79: Secuencia de ploteo

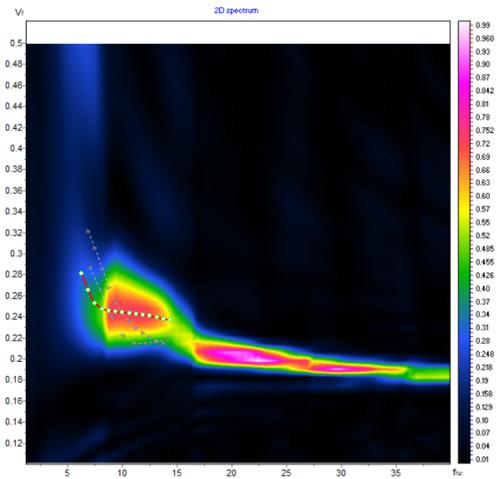
7.7 Curvas de dispersión

En la figura 7.80 se tiene un ejemplo de cómo es el comportamiento de las primeras cinco curvas de dispersión para la sección 112.

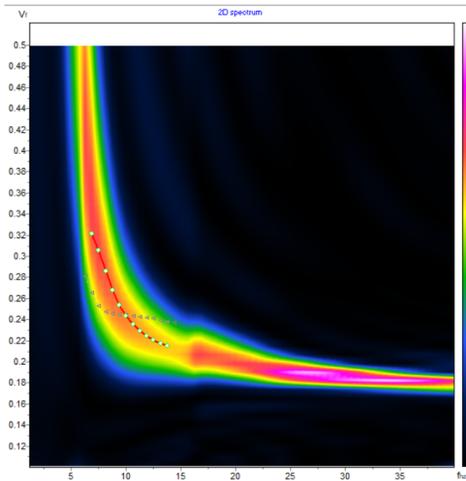
En el link 7.7 se encuentran todas las curvas de dispersión correspondientes a este trabajo, ya que por temas de espacio no se colocan todas, además, de estas curvas también se encuentra información valiosa sobre este trabajo como los datos con los que se trabajó, los modelos, imágenes de picados, etc. Es por ello que se ponen a disposición de quien lo necesite.



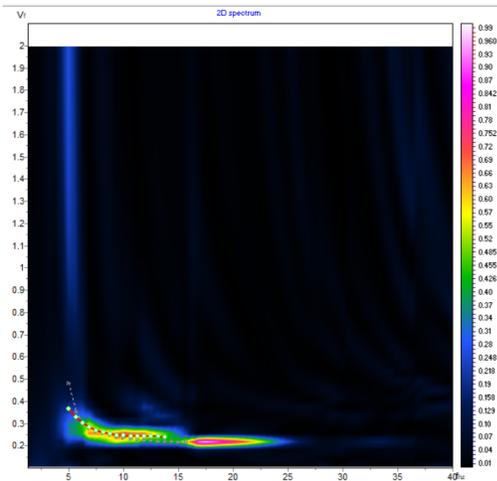
(a) Curva de dispersión 01 sección 112



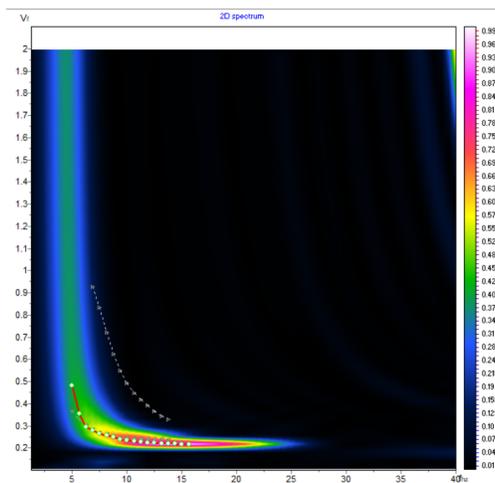
(b) Curva de dispersión 02 sección 112



(c) Curva de dispersión 03 sección 112



(d) Curva de dispersión 04 sección 112



(e) Curva de dispersión 05 sección 112

Figura 7.80: Curvas de dispersión sección 112

<https://drive.google.com/file/d/18LBoYofwlmhKESqIQVncAjNRMCC6AicL/view?usp=sharing>

7.8 Resultados de Análisis de ondas superficiales (MASW)

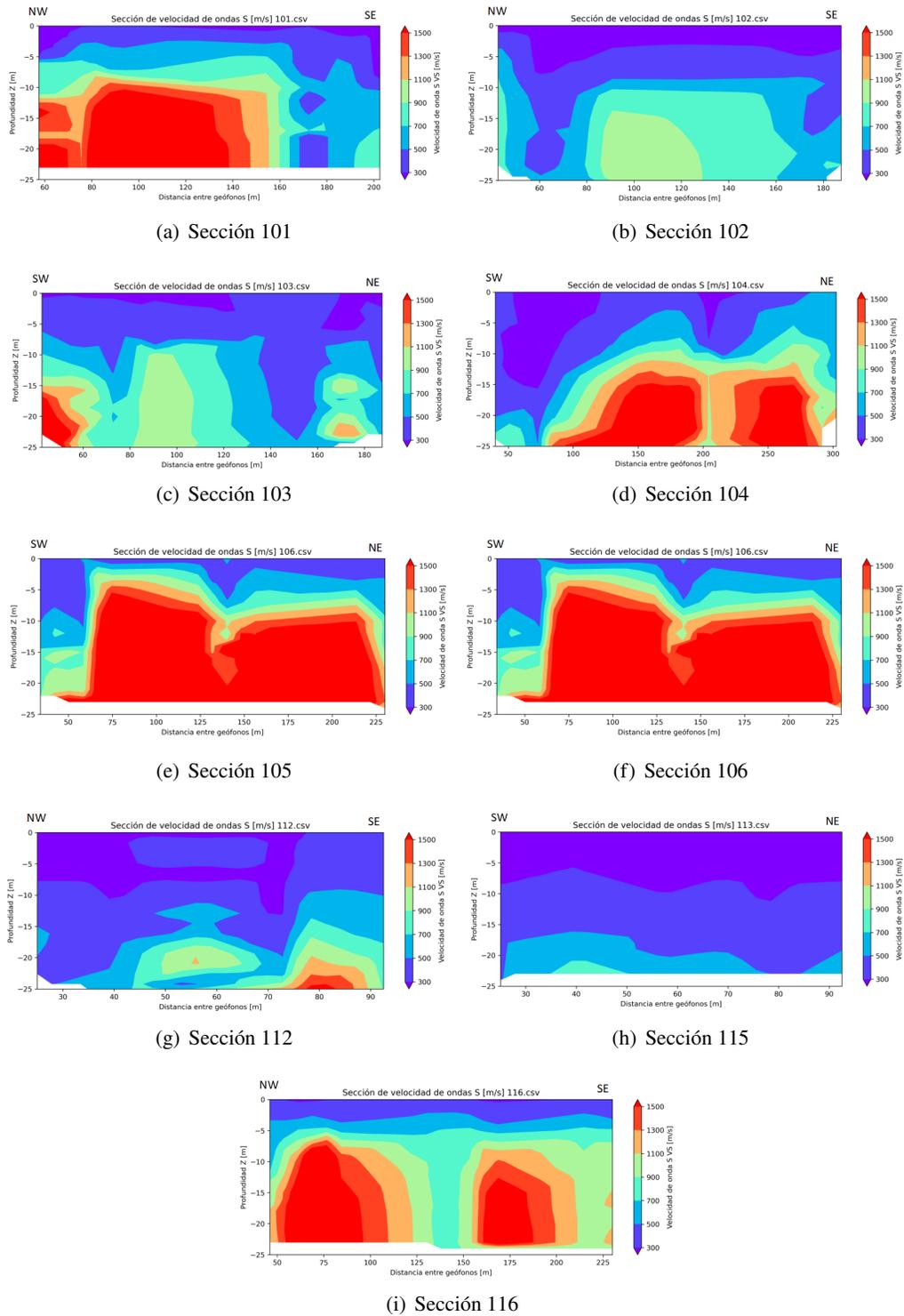


Figura 7.81: Resultado de ondas superficiales MASW para la parte inferior

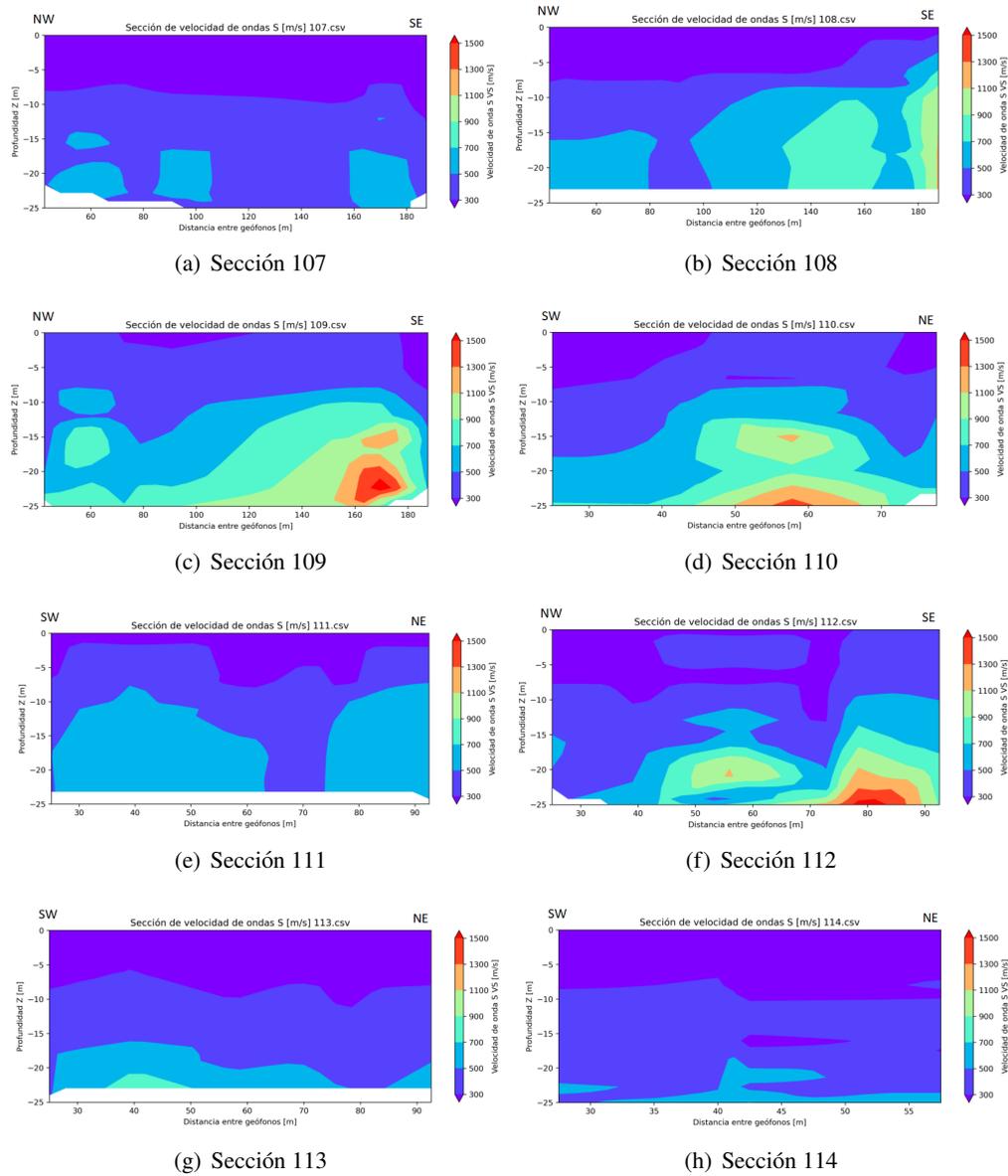


Figura 7.82: Resultado de ondas superficiales MASW para la parte superior

7.9 Prospección Eléctrica

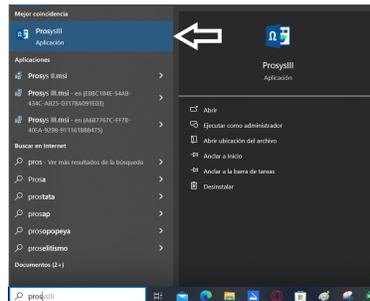
La última parte del procesamiento que se hace corresponde a la parte eléctrica para la cual se utilizan dos programas:

- Prosys
- Resipy

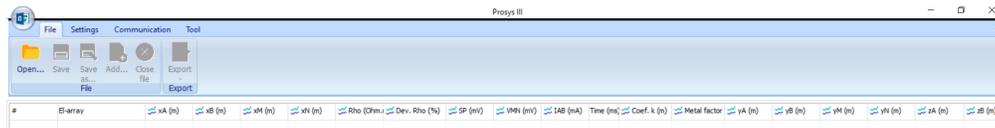
7.9.1 Prosys

En Prosys lo que se hace es básicamente un cambio de formato en los archivos para que puedan ser leídos con el programa que se explica en el siguiente apartado.

Lo primero es abrirlo y es buscarlo en el motor de búsqueda de Windows, una vez que ya está abierto se verá la figura siguiente.



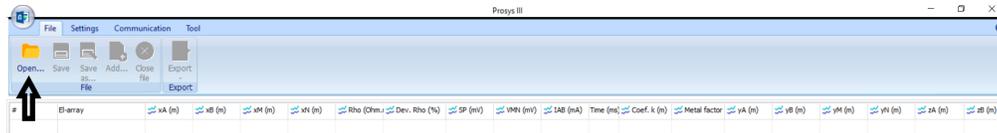
(a) Apertura de Prosys



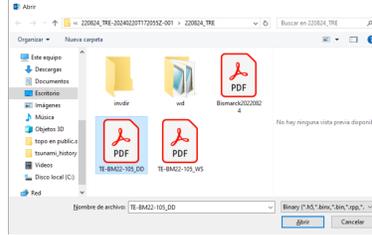
(b) Ventana de inicio Prosys

Figura 7.83: Secuencia de inicio Prosys

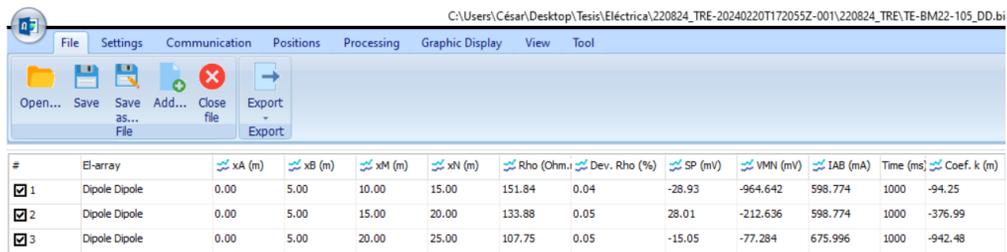
A continuación se va a ver el proceso para abrir un archivo que lleva como formato **.bin** el cual no puede ser leído con Resipy y con Prosys se puede convertir en un archivo con extensión **.csv** que si es un formato válido.



(a) Ícono de abrir archivos



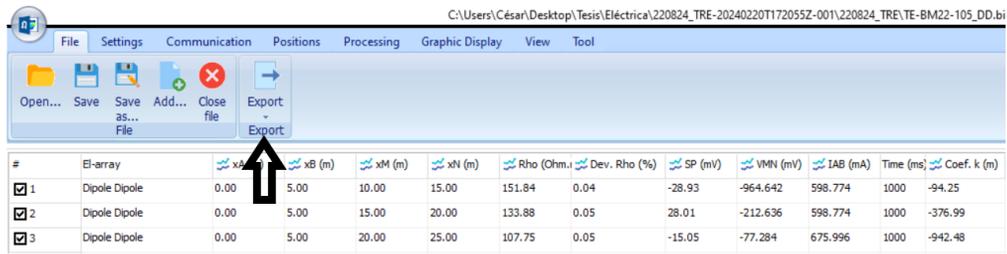
(b) Selección de archivo **.bin**



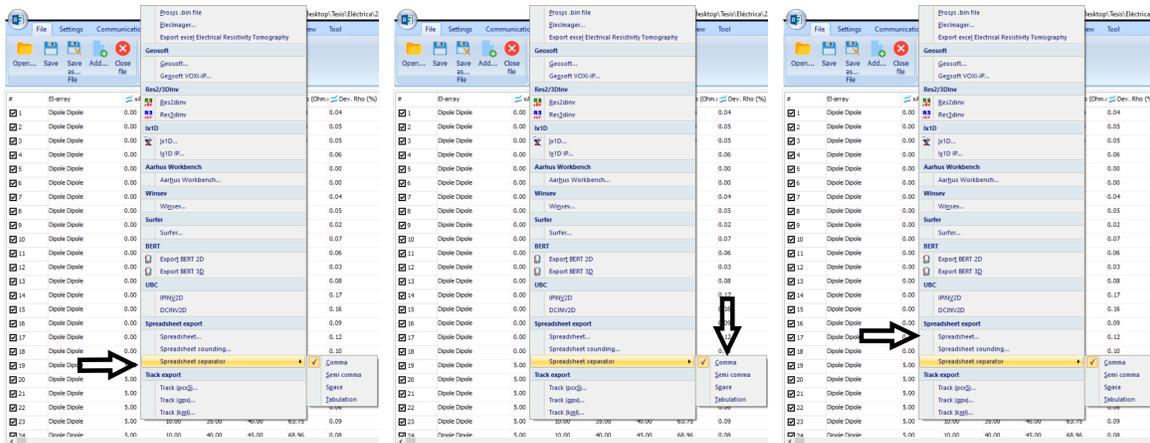
(c) Ventana de inicio con un archivo

Figura 7.84: Secuencia de apertura de datos **.bin**

A continuación vamos a exportar los datos como un archivo con formato **.csv** el cual es un formato válido para Resipy y el poder modificar el formato se hace en el ícono export, buscamos el apartado que lleva por nombre **Spreadsheet export** donde primero hay que indicar que es separado por comas y posteriormente seleccionar que en hoja de cálculo. Todo esto se puede ver en la figura siguiente.



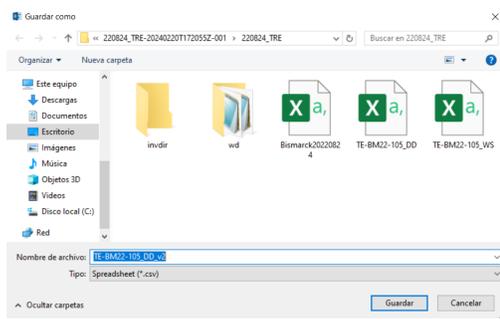
(a) Ícono de exportar datos



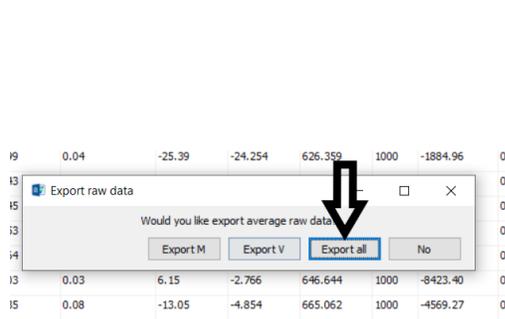
(b) Menú de separación

(c) Indicación de separación por comas

(d) Exportar como hoja de csv



(e) Creación de archivo



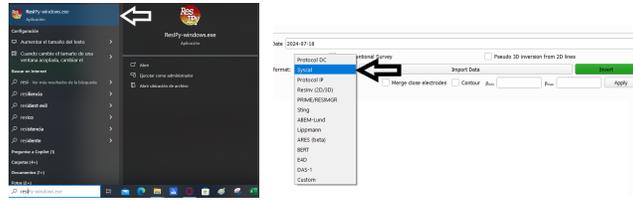
(f) Exportar toda la información

Figura 7.85: Secuencia de conversión a .csv

7.9.2 Resipy

Una vez que ya tenemos los archivos con formato **.csv** vamos a abrir el buscador de archivos de Windows y buscar el programa **Resipy** el cual consta de un ejecutable, se abre y tiene una interfaz muy simple en la cual lo primero que se hace por términos de practicidad es modificar el formato de los archivos que por defecto es **protocol DC**, sin embargo nosotros necesitamos tenerlo en **syscal** que es el equipo con el cual fueron tomados estos datos.

En la figura que se muestra a continuación podemos ver el ícono del ejecutable, la pantalla de inicio y el apartado para cambiar el formato de los archivos.

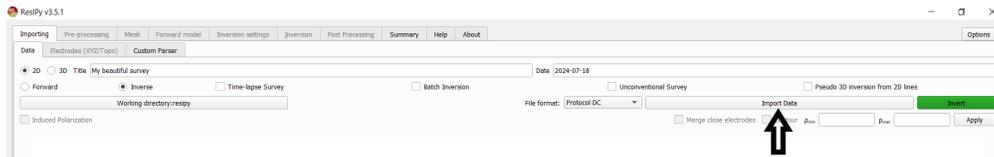


(a) Ícono Resipy (b) Pantalla principal

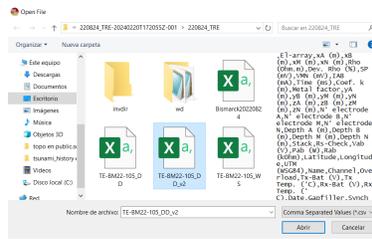
Figura 7.86: Apertura Resipy y selección de formato para archivos

Una vez que ya tenemos listo esto sigue cargando los archivos lo cual se hace dando click en el botón que lleva por nombre **import data** el cual está a lado del que se mostró en la imagen anterior, una vez que seleccionamos el botón se abre un explorador de archivos en el que vamos a seleccionar nuestro archivo correspondiente y se va a desplegar la geometría del arreglo que se obtuvo.

Esta secuencia se puede ver en la figura de la parte de abajo.



(a) Botón para cargar archivos



(b) Selección del archivo



(c) Ventana con datos

Figura 7.87: Secuencia de carga de archivos

En la figura anterior se nos es presentada una pseudosección ya que es la resistividad aparente, para obtener la resistividad real vamos a realizar el proceso de inversión el cual se puede ver con mayor claridad de como funciona en el apartado de geofísica y en el artículo de Blanchy

Para hacer la inversión tenemos un botón de color verde el cual se encuentra a la derecha del botón con el que cargamos los datos, una vez que se le de click a este botón se va a desplegar una ventana la cual nos indica que se está realizando el proceso y una vez que está finalizado se ve la sección eléctrica con una escala logarítmica la cual vamos a cambiar por $\omega.m$ la cual corresponde al sistema internacional.

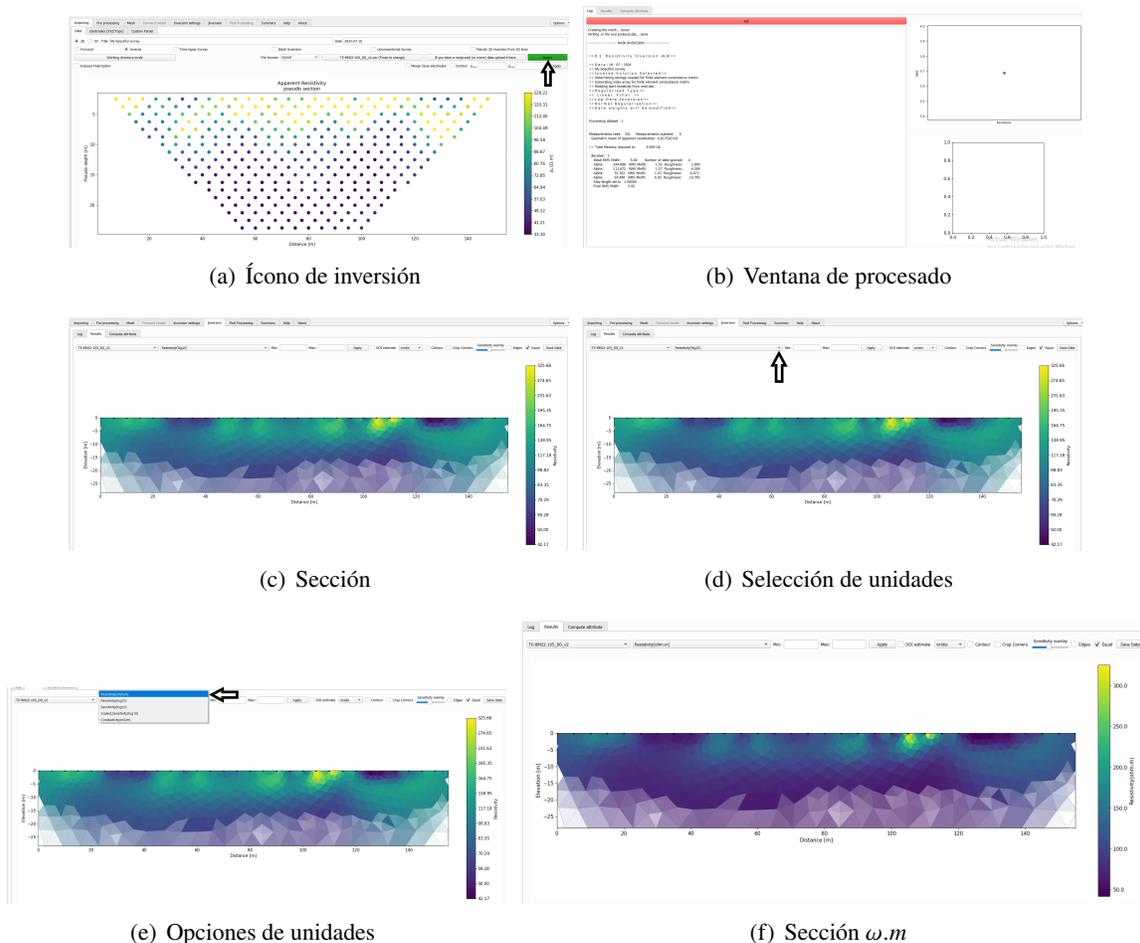
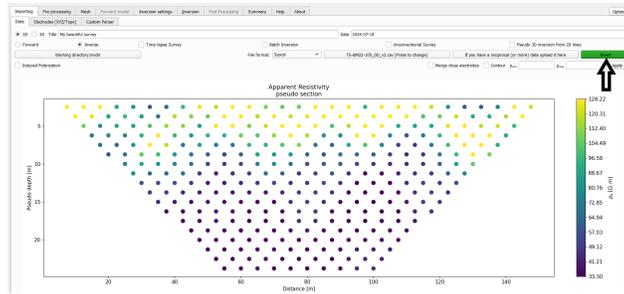


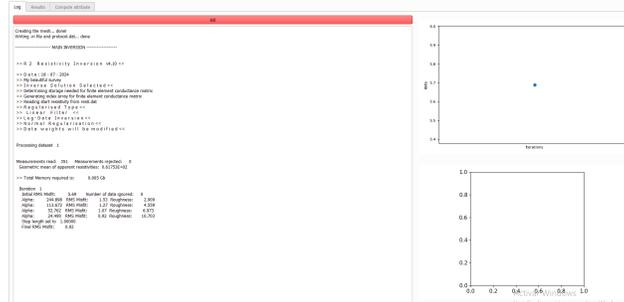
Figura 7.88: Secuencia de inversión

Una vez que ya tenemos nuestra sección podemos modificar un par de cosas por ejemplo es quitar la parte de los contornos que son una interpolación, además de cerrar las esquinas para que sea lo más parecido a la geometría del arreglo, esto lo hacemos seleccionando la casilla que lleva por nombre **Contour** y **Crop corners** que se encuentran en la parte superior derecha.

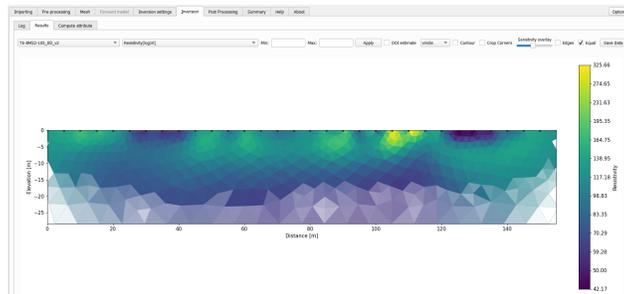
Se puede observar con más claridad en la figura que se encuentra en la parte inferior



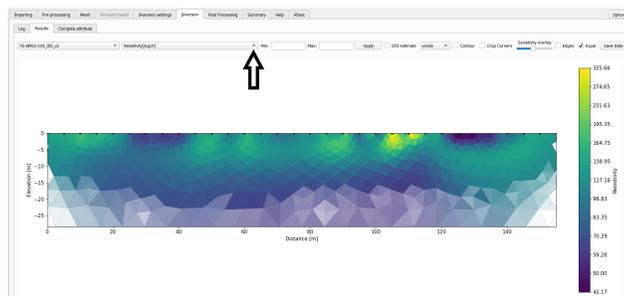
(a) Casilla de contorno



(b) Sección sin contorno



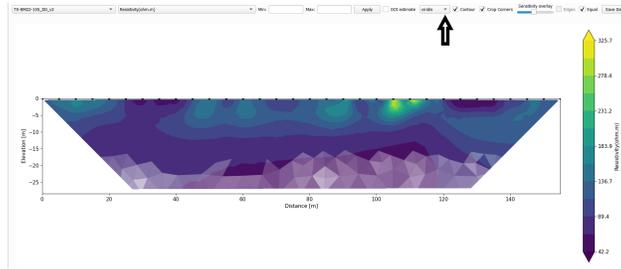
(c) Casilla de esquinas



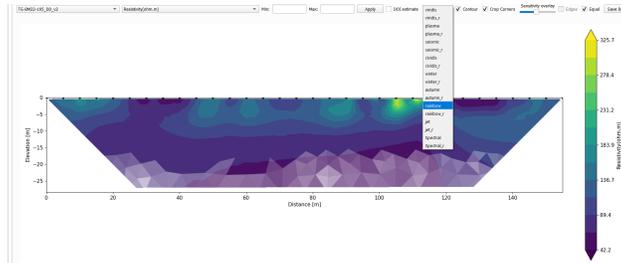
(d) Sección sin esquinas

Figura 7.89: Secuencia de inversión

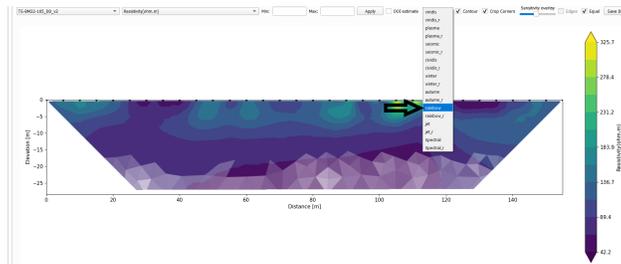
Por último en esta sección lo que se hace es cambiar la escala de colores de la sección a la que se llama **rainbow** que es la que usualmente se usa para presentar estas secciones.



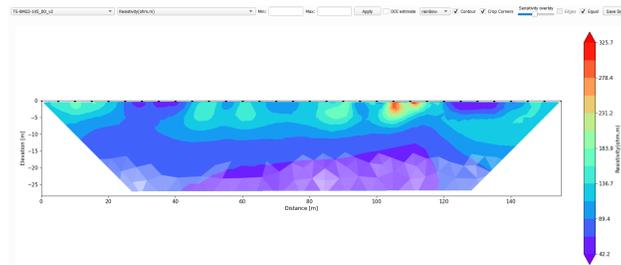
(a) Eliminación de contorno



(b) Sección sin contorno



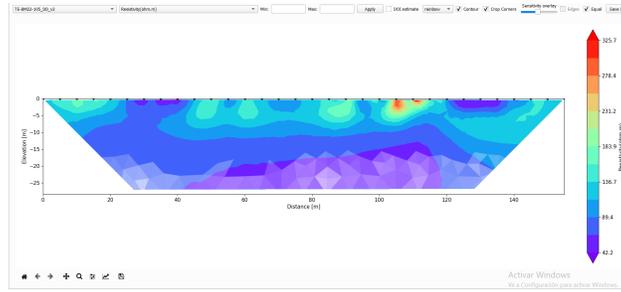
(c) Casilla de esquinas



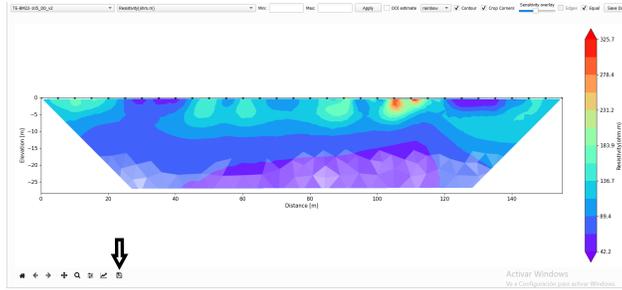
(d) Sección sin esquinas

Figura 7.90: Secuencia de cambio de escala de color

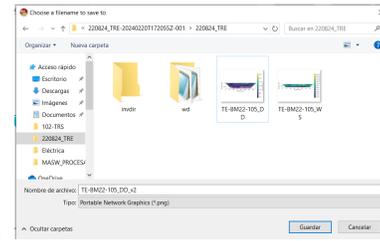
Por último se guarda la imagen que generamos como se muestra en la siguiente figura.



(a) Ventana de sección



(b) Ícono de guardado



(c) Explorador de archivos para guardar

Figura 7.91: Secuencia de guardado

Con esto se termina el apartado de procesamiento de datos para esta tesis, en la cual también se busca que sea una guía con la cual se puedan procesar datos de refracción sísmica, hacer el análisis de ondas superficiales y por último de los datos eléctricos.

En la siguiente sección se presentarán los resultados obtenidos para cada uno de los procesos ya antes mencionados,