

Estudio del nivel freático de la unidad acuífera del Miembro Superior de la Formación Los Santos, vereda La Fuente, municipio Los Santos del departamento de Santander, mediante los métodos geofísicos de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Sísmica de Refracción.

Shaired Vergel Navarro y Bianny Yurely Remolina Rivero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogos

Director:

Erwing Mauricio Niño Ferro

Físico, MSc. (c) en Geofísica

Codirectores:

Luisa Casadiegos Agudelo

Geóloga, MSc. (c) en Ingeniería Civil con énfasis en la Gestión del Recurso Hídrico Subterráneo

Sergio Andrés García Arias

Geólogo, MSc. en Geofísica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mi madre Tania Navarro, quien ha sido mi guía, mi apoyo y mi inspiración en cada paso de mi camino.

Gracias por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía y por animarme a perseguir mis sueños.

Esta tesis es el resultado de años de esfuerzo y dedicación, pero sé que nunca hubiera sido posible sin ti.

Tu amor incondicional y tu sabiduría han sido mi mayor fortaleza y me han enseñado que la perseverancia y el trabajo duro siempre valen la pena.

Por eso, quiero dedicarte este logro con todo mi corazón. Espero que esta tesis sea solo el comienzo de muchas cosas maravillosas que podamos lograr juntas. Gracias por ser mi ejemplo a seguir, por enseñarme a ser valiente y por ser la mejor mamá del mundo.

Con todo mi amor y gratitud,

Shaired Vergel

A mis padres Luz Sthela Rivero y Javier Remolina, por su inmenso amor, apoyo y compañía en cada uno de mis sueños, gracias por enseñarme a creer en mí, a ser fuerte y perseverante, soy inmensamente afortunada de tenerlos.

A mi hermano y a Cata por inspirarme a cumplir mis sueños.

A mi familia por ser mi motor de vida, a Cris por su apoyo incondicional.

A mi compañera de tesis Shaired Vergel, esta aventura no hubiese sido lo mismo sin ti.

Bianny Remolina

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por permitirme llegar a este punto en mi vida académica y por brindarme la fuerza y el coraje para seguir adelante.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al profesor Francisco Velandia por brindarme la oportunidad de aportar al proyecto integral del agua de la Mesa de los Santos, por su orientación y por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias en el área.

Asimismo, quiero agradecer a la profesora Rocío del Pilar Bernal Olaya por su colaboración en la adquisición de datos en campo, su disposición y ayuda fueron fundamentales para el éxito de este proyecto.

También quiero expresar mi gratitud al profesor Saúl Ernesto Guevara Ochoa y a José Pedro Mora por su valiosa colaboración en el trabajo de campo, su paciencia y su apoyo en el proyecto.

Agradezco a la profesora Gatsby Emperatriz López Otalvaro por sus palabras de apoyo en momentos difíciles y por creer en mí y en mis capacidades.

Agradezco a Gloria Prieto por escucharme y brindarme sus consejos en momentos de incertidumbre.

Agradezco a mi familia por su amor, apoyo incondicional y motivación constante. A mis amigos por ser mi soporte emocional.

Finalmente, agradezco a Bianny Remolina por su compañía, por ayudarme a sobrellevar el estrés y a mantener una actitud positiva.

Shaired Vergel

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Antecedentes.....	17
2. Planteamiento del problema	19
2.1 Justificación.....	19
2.2 Hipótesis.....	20
3. Objetivos.....	21
3.1 Objetivo General	21
3.2 Objetivos Específicos.....	21
4. Zona de estudio.....	22
4.1 Localización	22
4.2 Marco Geológico.....	23
4.2.1 Geología Regional	23
4.2.2 Geología Estructural.....	25
4.2.3 Hidrogeología.....	26
5. Marco teórico.....	29
5.1 Fundamentos de hidrogeología	29
5.2 Fundamentos geofísicos	33
5.2.1 Método Geoeléctrico	33

5.2.2 Métodos Sísmicos	43
5.2.2.1 Método de Refracción Sísmica	51
5.2.2.2 Análisis Multicanal De Ondas Superficiales (MASW).....	53
5.3 Módulos elásticos.....	54
5.3.1 Estimación de los parámetros elásticos en función de la velocidad de onda tipo P y S. .	55
6. Metodología.....	57
6.1 Etapa de pre-campo: Determinación de contrastes en el subsuelo.....	57
6.2 Etapa de campo: Adquisición de datos	59
6.2.1 Adquisición de datos geoelectricos	60
6.2.2 Adquisición de datos sísmicos	62
6.3 Fase de oficina: Clasificación del suelo y modelado/Inversión/Interpretación.....	66
6.3.1 Flujo de procesamiento Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)	66
6.3.2 Flujo de procesamiento Tomografía de Refracción Sísmica (TRS)	71
6.3.3 Flujo de procesamiento MASW1D	75
6.3.4 Flujo de procesamiento MASW2D	77
6.3.5 Clasificación del perfil del suelo.....	80
7. Resultados.....	82
7.1 Contrastes de las propiedades físicas del subsuelo a partir de TRE, TRS y MASW	82
7.1.1 Resultados Tomografía de Resistividad Eléctrica.....	82
7.1.1.1 Resultados TRE 01.....	82

7.1.1.2 Resultados TRE 02.....	84
7.1.2 Resultados Sísmica (TRS/MASW).....	85
7.1.2.1 Resultado SIS 01.....	85
7.1.2.2 Resultados SIS 02.....	89
7.1.2.3 Resultados SIS 03.....	93
7.1.3 Calculo Módulos Elásticos.....	98
7.1.3.1 Módulos Elásticos SIS01.....	98
7.1.3.2 Módulos Elásticos SIS02.....	99
7.1.3.3 Módulos Elásticos SIS03.....	100
7.2 Medición directa del nivel estático.....	100
8. Análisis de resultados.....	102
8.1 Discusión Resultados Geoeléctrica.....	102
8.1.1 Interpretación TRE 01.....	102
8.1.2 Interpretación TRE 02.....	103
8.2 Clasificación del perfil del suelo mediante las normas ASTDM D5777 y NSR-10.....	105
8.2.1 Interpretación SIS01.....	105
8.2.2 Interpretación SIS02.....	107
8.2.3 Interpretación SIS03.....	110
8.3 Interpretación geológica a partir de observaciones de campo y geofísica.....	113
9. Conclusiones.....	117

10. Recomendaciones	119
Referencias Bibliográficas	120

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Localización de la zona de estudio.....	22
Figura 2 Mapa geológico y estructural de la Mesa de Los Santos.....	24
Figura 3 Mapa de microcuencas de la Mesa de los Santos.....	28
Figura 4 Acuífero libre.....	30
Figura 5 Acuífero confinado.....	31
Figura 6 Acuífero semiconfinado	32
Figura 7 Configuración básica en estudios de Resistividad Eléctrica	34
Figura 8 Rangos típicos de resistividades/conductividades eléctricas de rocas, suelos y minerales	38
Figura 9 Disposición geométrica del arreglo de Schlumberger.....	39
Figura 10 Representación gráfica de los diferentes arreglos	41
Figura 11 Esquema de propagación de onda P.....	44
Figura 12 Esquema de propagación de onda S.....	46
Figura 13 Esquema de propagación de onda Rayleigh.....	50
Figura 14 Esquema de propagación de onda Love.....	51
Figura 15 Esquema de la Ley de Snell mostrando la interface entre dos medios diferentes.....	52
Figura 16 Representación del principio de Huygens	53
Figura 17 Diseño de adquisición de la línea 1 para la Tomografía de Refracción Sísmica, MASW1D y MASW2D.....	58
Figura 18 Diseño de adquisición de la línea 2 para la Tomografía de Refracción Sísmica, MASW1D y MASW2D.....	58

Figura 19 Diseño de adquisición de la línea 3 para la Tomografía de Refracción Sísmica, MASW1D y MASW2D.....	59
Figura 20 Distribución de las Tomografías De Resistividad Eléctrica en la zona de estudio	61
Figura 21 Adquisición de datos geoelectricos	62
Figura 22 Distribución de las líneas sísmicas en la zona de estudio	64
Figura 23 Adquisición de datos Sísmicos.....	65
Figura 24 Análisis de datos anómalos "Bad Data Points"	67
Figura 25 TRE inversión preliminar.....	69
Figura 26 Valores del Error Root Mean Square (RMSE) para el modelo generado.	70
Figura 27 Modelo final de la TRE01 con arreglo Schlumberger.....	71
Figura 28 Picado de los primeros arribos de las ondas refractadas críticamente.....	72
Figura 29 Primeros arribos de las ondas refractadas críticamente.....	72
Figura 30 Primeros arribos de las ondas refractadas críticamente.....	74
Figura 31 Modelo preliminar de la velocidad de onda P	74
Figura 32 Tomografía Sísmica de refracción mediante una inversión por mínimos cuadrados... 75	
Figura 33 Dato transformado en el dominio de velocidad de fase vs frecuencia aplicando la transformada de Fourier rápido (FFT).	76
Figura 34 Curva de dispersión para el modo fundamental y modelo del subsuelo en un perfil 1D de la velocidad de onda de corte (Vs) versus la profundidad.....	77
Figura 35 Procesamiento MASW2D Punto Medio Común.....	78
Figura 36 Procesamiento MASW2D	79
Figura 37 Modelo final del subsuelo 2D de la velocidad de onda de corte (Vs).....	80
Figura 38 Resultado Tomografía de Resistividad Eléctrica TRE 01	83

Figura 39 Resultado Tomografía de Resistividad Eléctrica TRE 02.....	85
Figura 40 Modelo preliminar de la velocidad de onda P línea 1 (SIS01).....	86
Figura 41 Tomografía Sísmica de refracción mediante una inversión por mínimos cuadrados línea 1 (SIS01).....	87
Figura 42 Modelo del subsuelo en un perfil 1D de la velocidad de onda de corte (Vs) versus la profundidad para la línea 1 (SIS01).....	88
Figura 43 Modelo final del subsuelo 2D de la velocidad de onda de corte (Vs), línea 1 (SIS01).	89
Figura 44 Modelo preliminar de la velocidad de onda P línea 2 (SIS02).....	90
Figura 45 Tomografía Sísmica de refracción mediante una inversión por mínimos cuadrados línea 2 (SIS02).....	91
Figura 46 Modelo del subsuelo en un perfil 1D de la velocidad de onda de corte (Vs) versus la profundidad para la línea 2 (SIS02).....	92
Figura 47 Modelo final del subsuelo 2D de la velocidad de onda de corte (Vs), línea 2 (SIS02).	93
Figura 48 Modelo preliminar de la velocidad de onda P línea 3 (SIS03).....	94
Figura 49 Tomografía Sísmica de refracción mediante una inversión por mínimos cuadrados línea 3 (SIS03).....	95
Figura 50 Modelo del subsuelo en un perfil 1D de la velocidad de onda de corte (Vs) versus la profundidad para la línea 3 (SIS03).....	96
Figura 51 Modelo final del subsuelo 2D de la velocidad de onda de corte (Vs), línea 3 (SIS03).	97
Figura 52 Medición directa del nivel estático en un predio de la vereda la Fuente.....	101
Figura 53 Tomografía de resistividad eléctrica TRE 01 interpretada.....	103
Figura 54 Tomografía de resistividad eléctrica TRE 02 interpretada.....	104
Figura 55 Tomografía de Refracción Sísmica SIS 01 interpretada	105

Figura 56 MASW 1D en el centro de la línea 1 SIS01	106
Figura 57 MASW 2D SIS01 interpretada.....	107
Figura 58 Tomografía de Refracción Sísmica SIS 02 interpretada	108
Figura 59 MASW 1D en el centro de la línea SIS 02.....	109
Figura 60 MASW 2D SIS 02 interpretada.....	110
Figura 61 Tomografía de Refracción Sísmica SIS 03 interpretada	111
Figura 62 MASW 1D en el centro de la línea SIS 03.....	112
Figura 63 MASW 2D SIS 03 interpretada.....	113
Figura 64 Perfil geológico 01 obtenido con la relación de la Tomografía de Refracción Sísmica, MASW Y la TRE.....	114
Figura 65 Perfil geológico 02 obtenido con la relación de la Tomografía de Refracción Sísmica, MASW Y la TRE.....	115

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Valores de K para las principales configuraciones electrónicas.....	37
Tabla 2 Rangos de resistividad asociados a los tipos de roca existentes	42
Tabla 3 Clasificación de los perfiles de suelo considerando los valores de velocidad de onda P según la Norma ASTM D5777	45
Tabla 4 Clasificación de los perfiles de suelo considerando los valores de velocidad de onda de corte promedio a 30 metros según la Norma Sismo Resistente NSR10	47
Tabla 5 Coordenadas punto inicial, central y final de líneas sísmicas y tomografías de resistividad eléctrica.....	59
Tabla 6 Parámetros usados para la prospección sísmica	65
Tabla 7 Parámetros usados para el procesamiento de las tomografías de resistividad eléctrica (TRE).	68
Tabla 8 Parámetros elásticos estimados para la SIS 01 en la abscisa X=94metros.....	98
Tabla 9 Parámetros elásticos estimados para la SIS 02 en la abscisa X=94metros.....	99
Tabla 10 Parámetros elásticos estimados para la SIS 03 en la abscisa X=23.5metros.....	100

Resumen

Título: Estudio del nivel freático de la unidad acuífera del Miembro Superior de la Formación Los Santos, vereda La Fuente, municipio Los Santos del departamento de Santander, mediante los métodos geofísicos de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Sísmica de Refracción *

Autor: Shaired Vergel Navarro y Bianny Yurely Remolina Rivero **

Palabras Clave: Hidrogeología, geofísica, zona saturada, fracturamiento.

Descripción: La Mesa de Los Santos es un área de aproximadamente 430 km² donde el crecimiento demográfico en las últimas décadas ha generado una consecuencia directa en el recurso hídrico existente en el área, ya que este no es suficiente para satisfacer la demanda de agua requerida por sus habitantes, es así como la falta de este recurso ha impulsado la necesidad de idear nuevas estrategias para la búsqueda de fuentes de agua natural, entre ellas el agua subterránea. Este trabajo tuvo como objetivo estimar el nivel freático en un sector de la vereda La Fuente, ubicada en el municipio de Los Santos, en el departamento de Santander, mediante el uso de dos métodos sísmicos correspondientes a Sísmica de Refracción y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW1D y MASW2D), se utilizó la Tomografía de Resistividad Eléctrica como método geoelectrico con el arreglo Schlumberger. Con el uso de estos métodos se generaron modelos unidimensionales y bidimensionales que permitieron clasificar el perfil del suelo de acuerdo con la velocidad de onda S y la velocidad de onda P, así mismo mediante las Tomografías de Resistividad Eléctrica se pudo identificar las zonas saturadas donde la resistividad de la Formación Los Santos presentaba valores inferiores a 1000 Ω *m. Finalmente se elaboraron dos perfiles geológicos de la zona estudiada identificando en ellos el nivel freático (un primer nivel discontinuo entre los 5 y 10 metros de profundidad, y un segundo nivel entre los 35 y 40 metros de profundidad) y se obtuvo información en profundidad referente a suelo superficial caracterizado por la presencia de material meteorizado, a suelo con poca presencia de agua, seguido por las areniscas del Miembro Superior de la Formación Los Santos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Geología. Director: Erwing Mauricio Niño Ferro. MSc. (c) en Geofísica. Codirector: Luisa Casadiegos Agudelo. MSc. (c) en Ingeniería Civil con énfasis en la Gestión del Recurso Hídrico Subterráneo. Sergio Andrés García Arias. MSc. en Geofísica.

Abstract

Title: Study of the water table level of the aquifer unit of the upper member of the Los Santos Formation, village of La Fuente, municipality of Los Santos, department of Santander, using the geophysical methods of Electrical Resistivity Tomography and Seismic Refraction*

Author(s): Shaired Vergel Navarro y Bianny Yurely Remolina Rivero ¹

Key Words: Hydrogeology, geophysics, saturated zone, fracturing.

Description: Mesa de Los Santos is an area of approximately 430 km² where population growth in recent decades has generated a direct consequence in the existing water resources in the area, since this is no longer sufficient to satisfy the demand for water required by its inhabitants, this is how the lack of this resource has promoted the need to devise new strategies for the search for natural water sources, including groundwater.

The objective of this work was to estimate the water table in a sector of the village of La Fuente, located in the municipality of Los Santos, in the department of Santander, using two seismic methods corresponding to Seismic Refraction and Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW1D and MASW2D), and Electrical Resistivity Tomography was used as the geoelectric method with the Schlumberger array. With the use of these methods, one-dimensional and two-dimensional models were generated that allowed the classification of the soil profile according to the velocity of the S wave and the velocity of the P wave, likewise through the Electrical Resistivity Tomographies it was possible to identify the saturated zones where the resistivity of the Los Santos Formation presented values below 1000 $\Omega \cdot m$. Finally, two geological profiles of the studied area were prepared, identifying in them the phreatic level (a first discontinuous level between 5 and 10 meters deep, and a second level between 35 and 40 meters deep) and in-depth information was obtained regarding to superficial soil characterized by the presence of weathered material, to soil with little presence of water, followed by the sandstones of the Upper Member of the Los Santos Formation.

* Degree Work

¹Faculty of Physicochemical Engineering. Geology school. Geology. Director: Erwing Mauricio Niño Ferro. MSc. (c) in Geophysics. Co-director: Luisa Casadiegos Agudelo. MSc. (c) in Civil Engineering with an emphasis on Underground Water Resource Management. Sergio Andrés García Arias. MSc. in Geophysics.

Introducción

Según el programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2003), el agua cubre el 70% de la superficie terrestre de la cual el 97% del agua es salada y sólo el 3% es dulce. Los polos y los glaciares contienen el 74% del agua dulce del mundo y casi el 26% es subterránea; actualmente la dependencia del agua subterránea se encuentra en aumento, debido a la demanda de agua, combinada con la variación de los patrones de precipitación. Para el aprovechamiento de este recurso es necesario perforar pozos en unidades hidrogeológicas conformadas por formaciones geológicas porosas y permeables que faciliten el almacenamiento de cantidades apreciables de agua (Sánchez San Román, 2017).

El desarrollo económico en el municipio de Los Santos ha tenido un incremento producto a las crecientes actividades agropecuarias y enfoque turístico que ha ejecutado el municipio; lo que ha generado una creciente demanda del recurso hídrico que se ha visto afectado por los factores geomorfológicos, climáticos y la contaminación de algunas fuentes hídricas (García & Gómez, 2015). Este proyecto de investigación se desarrolló en el marco del “*Estudio Integral del Agua en la Mesa de Los Santos*”, con el fin de contribuir al modelo hidrogeológico conceptual de La Mesa de los Santos, estudiando el nivel freático en la unidad acuífera del Miembro Superior de la Formación Los Santos en un predio de la vereda La Fuente mediante métodos geofísicos no invasivos correspondientes a Sísmica de Refracción y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).

Para llevar a cabo este proyecto se ejecutaron tres etapas: una primera etapa de pre-campo, la cual consistió en la búsqueda, selección y organización de información geológica y geofísica, incluyendo la salida de reconocimiento al área de estudio. La segunda etapa, conocida como la

etapa de campo, implicó la adquisición geofísica, así como el procesamiento de datos sísmicos y eléctricos para crear modelos del subsuelo unidimensionales y bidimensionales de acuerdo con las velocidades de onda P y onda S.

En la última fase llamada fase de oficina, se procedió a integrar y analizar los resultados obtenidos, mediante la clasificación del suelo y modelado. Con el fin de mejorar la precisión de la interpretación, se llevó a cabo la clasificación de los perfiles del suelo de acuerdo con las normas ASTM D5777 y NSR-10, y se tuvo en cuenta los cambios en la resistividad observados en la Tomografía de Resistividad Eléctrica. Los resultados obtenidos permitieron la generación de modelos geológicos, los cuales incluyen información sobre los espesores y materiales presentes, así como la identificación del nivel freático.

1. Antecedentes

La Mesa de Los Santos ha sido estudiada por diferentes autores hasta la actualidad. Con respecto a la geología de la zona de estudio Julivert (1958) presenta un estudio sobre la morfoestructura de la zona de Mesas al SW de Bucaramanga; Morales (1958) describe la Formación Tambor como una sucesión de areniscas que aflora a lo largo del Cañón del Río Lebrija, las cuales fueron renombradas por Cediell (1968) de acuerdo con su localidad tipo denominándola Formación Los Santos la cual describe que está constituida por tres miembros litoestratigráficos. Royero & Clavijo (2001) en la memoria geológica explicativa del departamento de Santander realizan una descripción general y completa de la tectónica y estratigrafía de la región. Vargas (2008) en su trabajo de grado realiza una cartografía geológica a escala 1:25.000 de la Mesa de Los Santos, donde presenta sus características estratigráficas, petrográficas y estructurales.

En el aspecto hidrogeológico, Pinto et al., (2007) realizan diferentes estudios con objetivos hidrogeológicos para la caracterización de las zonas más favorables para la acumulación de aguas subterráneas en la Mesa de Los Santos, diferenciando en siete zonas hidrogeológicas donde la zona I y II corresponden a un alto interés hidrogeológico (norte de la Mesa de Los Santos), la zona III y IV corresponden a zonas de interés medio (centro de la Mesa de Los Santos) y las zonas V, VI y VII corresponden a zonas de poco interés hidrogeológico, concluyendo que la Formación Los Santos es la de un mayor interés. Hincapié & Veloza (2009) presentan un informe hidrogeológico de la Mesa de Los Santos donde determinan que los miembros Superior e Inferior de la Formación Los Santos son de gran interés hidrogeológico. Por su parte Contreras (2008) considera dos sectores de gran interés hidrogeológico, el primero al noreste de la Mesa el cual probablemente constituye un acuífero en donde las fracturas son de gran importancia ya que permiten la recarga

de este, y el segundo sector de gran interés corresponde al centro de la Mesa en el cual a profundidad va aumentando el grado de fracturamiento, indicando que es un acuífero fracturado.

En cuanto a los estudios geofísicos que se han desarrollado en la Mesa de Los Santos se encuentran los de Moyano (2010), Morales et al. (2010), Gómez et al. (2014), García & Gómez (2015) e IngeoExploraciones (2016). Los resultados de estos estudios geofísicos han aportado información sobre los diferentes rangos de resistividad que presentan la Formación Los Santos y la Formación Rosablanca, considerándose que la zona de mayor potencial hidrogeológico se asocia con la Formación Los Santos, principalmente el Miembro Superior de la Formación Los Santos ya que posee una porosidad secundaria alta causada por el fracturamiento de la roca, y generando un aumento en la permeabilidad de este. La acumulación y movimiento de aguas subterráneas se puede asociar a la naturaleza fracturada de las formaciones, generada por el componente estructural de esta zona conformada por fallas principales y fallas secundarias, siendo estas últimas influyentes en el control para el flujo de agua subterránea (IngeoExploraciones, 2016).

2. Planteamiento del problema

El agua subterránea es el mayor almacén de agua dulce del mundo, con un volumen estimado de 23 millones de km³ en los 2 km superiores de la corteza continental de la Tierra, y solo 1,4 millones de km³ de esta agua almacenada es “moderna”, lo que significa que entro en el subsuelo hace menos de 50 años (Gleeson et al., 2016). Este recurso tiene el potencial de proporcionar a las sociedades enormes beneficios sociales, económicos y medioambientales (UNESCO, 2022).

De acuerdo con el informe de IngeoExploraciones (2016) para la Corporación Autónoma Regional de Santander – CAS, los periodos largos de sequía, presentados en los últimos años y la indiscriminada captación de aguas subterráneas a partir de pozos profundos y cisternas en la Mesa de Los Santos, ha generado una creciente escasez de agua en las corrientes superficiales, la afectación de pozos someros y con ellas los cultivos y la fauna.

Debido a lo anterior este proyecto se desarrolló con el fin de contribuir en el entendimiento de los cambios laterales del nivel freático en el Miembro Superior de la Formación Los Santos. Se tomó como caso de estudio un predio ubicado en la Vereda La Fuente bajo la siguiente pregunta de investigación: ¿A qué profundidad se encuentra el nivel freático de la unidad acuífera del Miembro Superior de la Formación Los Santos en la vereda La Fuente?

2.1 Justificación

La capacidad de los sistemas de agua subterránea depende de sus propiedades, que varían geográficamente, y está influenciada por los procesos naturales y humanos, el agotamiento de estos se produce cuando la descarga supera la recarga, la mayor parte de las disminuciones en el

almacenamiento global de aguas subterráneas a largo plazo, son consecuencia de la extracción intensiva, sin dejar a un lado la variabilidad del clima y el cambio climático. Por otra parte, la contaminación de este recurso reduce la idoneidad de las aguas extraídas para el consumo, afecta a múltiples ecosistemas y es un proceso prácticamente irreversible (UNESCO, 2022).

Los métodos geofísicos aplicados a la hidrogeología son muy útiles para la exploración de aguas subterráneas ya que reducen la incertidumbre de la localización de posibles acuíferos o zonas fracturadas y meteorizadas por la presencia de agua y las propiedades físicas del subsuelo (Telford et al. 1990). Teniendo en cuenta las limitaciones que pueden llegar a tener los métodos geofísicos cuando hay ausencia de contrastes, ruido o múltiples soluciones, este trabajo propone el uso de varios métodos geofísicos: Tomografía de Resistividad Eléctrica, Sísmica de Refracción y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales; todo esto con el fin de estudiar la unidad acuífera, identificar zonas saturadas e inferir el nivel freático.

2.2 Hipótesis

Considerando los estudios previos y siendo interés la zona saturada del Miembro Superior de la Formación Los Santos se plantea la hipótesis de:

El Miembro Superior de la Formación Los Santos en su mayoría se encuentra saturado, siendo mayor la acumulación de agua en el nivel meteorizado. Estas zonas de acumulación pueden estar delimitadas por la existencia de capas arcillosas en el Miembro Superior de la Formación Los Santos y estar afectadas por fracturamiento.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Estimar el nivel freático en un sector de la vereda La Fuente aplicando técnicas geofísicas como la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), Refracción Sísmica (TRS) y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW).

3.2 Objetivos Específicos

Determinar los contrastes de las propiedades físicas del subsuelo asociadas a la resistividad eléctrica y velocidad de onda sísmica tipo P y tipo S, mediante el levantamiento de datos geofísicos en superficie de TRE, TRS y MASW.

Clasificar el perfil del suelo mediante la Norma Sismo Resistente NSR-10 y la Normativa Internacional para la ejecución del método de Refracción Sísmica ASTM D5777.

Proponer una interpretación geológica de la zona estudiada a partir de las observaciones de campo y de las mediciones geofísicas, con el fin de obtener modelos del subsuelo en términos de espesores, materiales, así como la identificación del nivel freático.

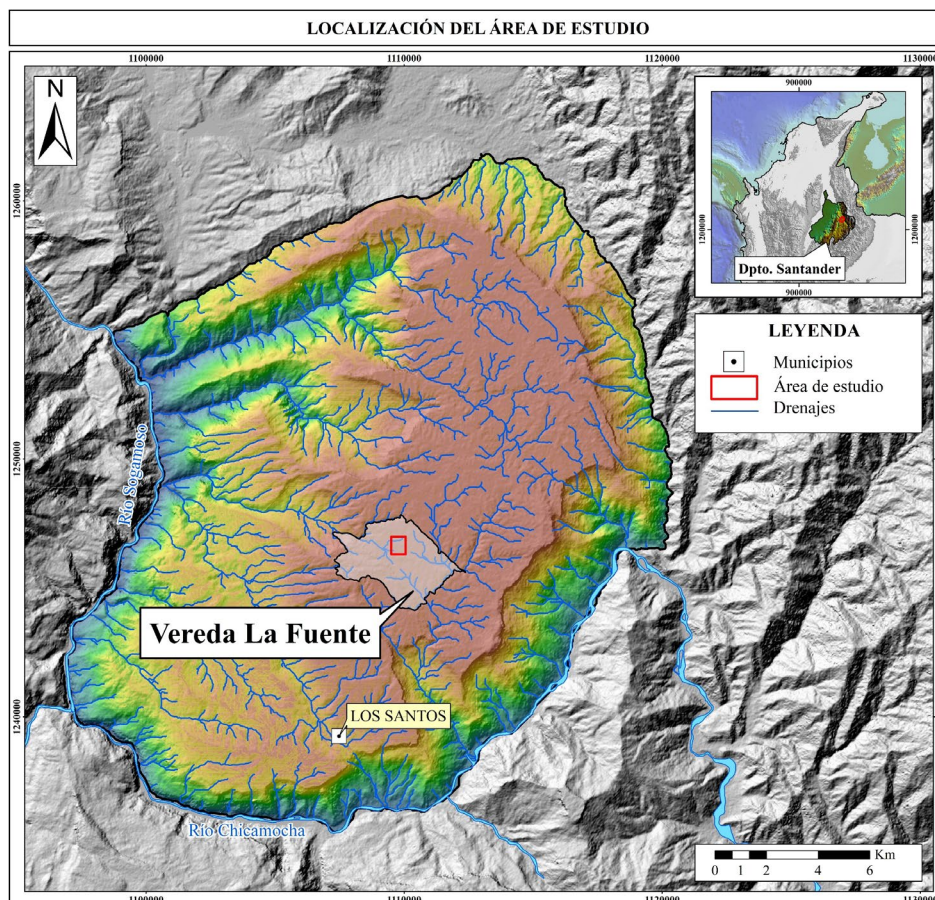
4. Zona de estudio

4.1 Localización

La zona de estudio se encuentra localizada en la provincia de Soto, al Nororiente Colombiano, en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental, al Noreste del departamento de Santander, en el municipio de Los Santos, específicamente en un predio de la vereda La Fuente (Figura 1), delimitado por el sistema coordenadas planas MAGNA Colombia Bogotá: $X_1 = 1'110.488$ y $X_2 = 1'110.084$ en el norte y $Y_1 = 1'247.000$ y $Y_2 = 1'246.285$ en el oeste.

Figura 1

Localización de la zona de estudio



4.2 Marco Geológico

La Mesa de Los Santos cubre un área de aproximadamente 430 km² que comprende los municipios de Los Santos, Girón y Piedecuesta, del departamento de Santander. Fisiográficamente se localiza en el costado oeste de la Cordillera Oriental. A continuación, se profundiza sobre la geología regional, geología estructural e hidrogeología de la zona de estudio.

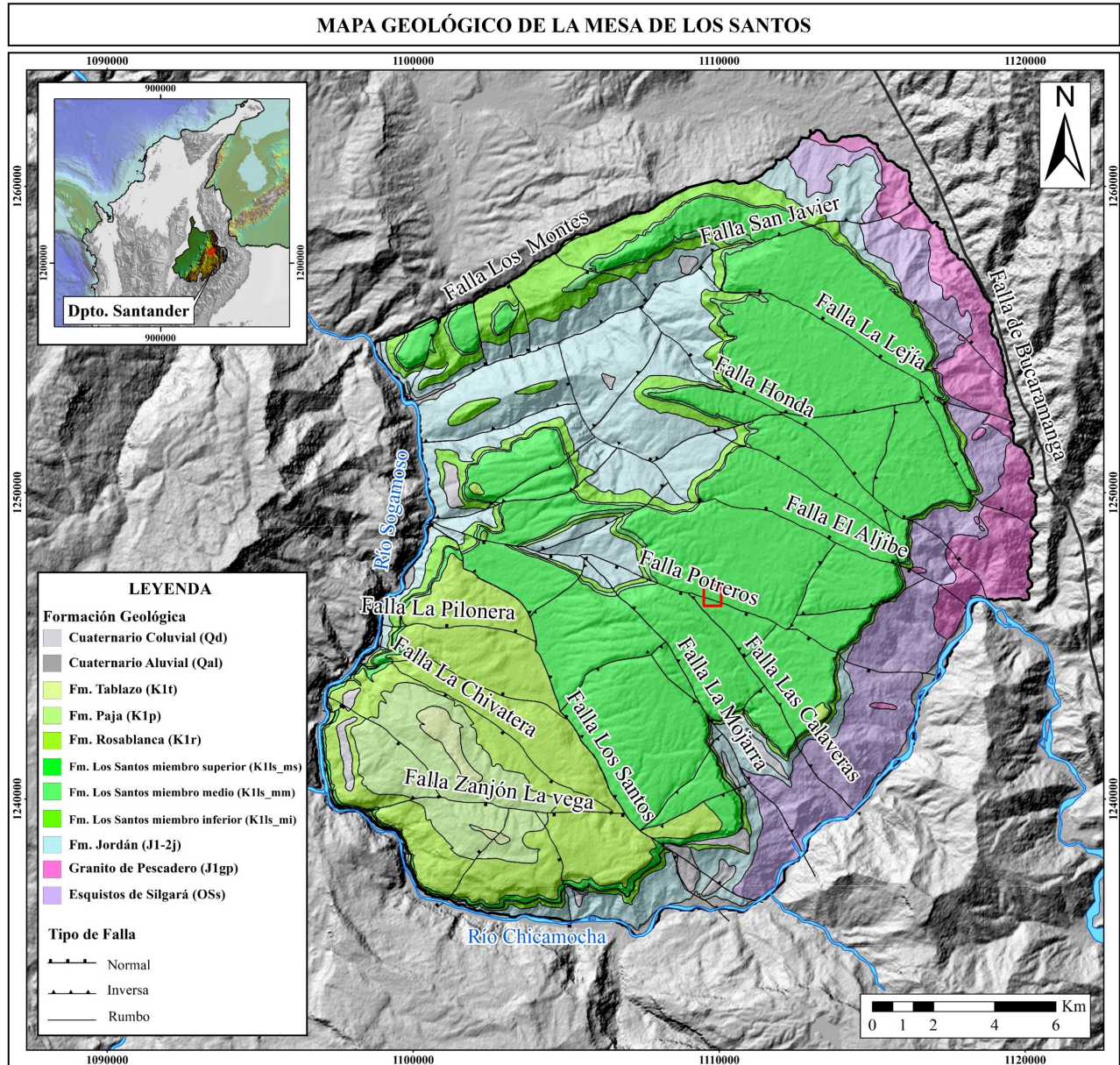
4.2.1 Geología Regional

La geología de la Mesa de Los Santos se compone de rocas metamórficas del Paleozoico representadas por la Formación Silgará, rocas ígneas de tipo granítico de edad Jurásico como el Granito de Pescadero y rocas sedimentarias que corresponden a la Formación Jordán de edad Jurásico. Rocas sedimentarias del Cretáceo inferior que varían entre areniscas, conglomerados, limolitas, arcillolitas y calizas suprayacen estas unidades, las cuales se han cartografiado como las formaciones Los Santos, Rosablanca, Paja, Tablazo y depósitos no consolidados del Cenozoico (Diaz., et al 2009) (Figura 2).

Litológicamente la Formación Los Santos se subdivide en tres miembros: el Miembro Inferior el cual está constituido por capas medias a gruesas de conglomerados arenosos y areniscas conglomeráticas, este miembro presenta un cambio facial hacia el SW de la Mesa donde se constituye de areniscas de grano medio a grueso, presentando un espesor de 102 metros (Aldana, 2008) ; el Miembro Medio se compone de limolitas y arcillolitas intercalas con areniscas de grano muy fino a medio, su espesor es de 21,8 metros (Aldana, 2008); el Miembro Superior está conformado por cuarzoarenitas y sublitoarenitas en capas medias a gruesas (Moyano, 2010), el espesor de este miembro es de 95,3 metros (Aldana, 2008).

Figura 2

Mapa geológico y estructural de la Mesa de Los Santos



Nota. Adaptado de García (2022).

4.2.2 Geología Estructural

La Mesa de los Santos se localiza en la denominada región de mesas y cuestras de la Cordillera Oriental, la cual es el resultado de complejos procesos sedimentarios y tectónicos correspondientes a la orogenia de los Andes del Norte; la zona de estudio esta influenciada por dos estructuras importantes las cuales son las fallas de Suárez y Bucaramanga, las cuales indican un ambiente tectónico de transgresión oblicua y han producido procesos de deformación de la secuencia sedimentaria del Jurásico - Cretácico (Pinto et al., 2007). Esta zona está afectada por una tectónica compresiva de bloques, en la que predomina el fallamiento inverso, las estructuras regionales predominantes (falla de Bucaramanga y Suarez) generan una porosidad secundaria debido al fracturamiento (IngeoExploraciones, 2016).

De acuerdo con Hincapié & Veloza (2009) la falla Los Santos presenta una dirección NW, y se establece como posible barrera impermeable del flujo de agua evidenciado en los nacimientos ubicados al oriente de la falla, también agregan que los patrones de diaclasamiento tienden a ser paralelos o perpendiculares a los sistemas de fallas y se constituyen como vías preferenciales de flujo subterráneo en la zona.

Hincapié & Veloza (2009) han definido tres sistemas de fallas con características geométricas y cinemáticas particulares:

- Un sistema longitudinal donde las fallas principales muestran una dirección predominante NW.
- Un sistema transversal de fallas con dirección principal NE
- Un sistema menor de fallas con dirección EW

De acuerdo con Velandia et al., 2020. la mayoría de las fallas tienen un componente de rumbo por estar orientadas en forma oblicua a los tensores de esfuerzos en la zona y especialmente las fallas longitudinales NW han sido definidas como transtensivas y favorables para el tránsito de fluidos.

García (2022) ha catalogado como fallas de rumbo sinistral con componente normal a las fallas Potreros, La Lejía, Honda, Aljibe correspondientes a la zona de estudio, también ha catalogado como fallas de rumbo dextral con componente normal a las fallas Zanjón de La Vega y la Pilonera, fallas de rumbo sinestrales con componente inverso a la falla Los Santos, Calaveras y la Mojarra, finalmente ha catalogado como fallas de rumbo dextral con componente inverso a las fallas Los Montes y San Javier (Figura 2).

4.2.3 Hidrogeología

En la zona de estudio se han realizado diversos estudios con fines hidrogeológicos que han enriquecido el conocimiento que se tiene de la Mesa de Los Santos como los publicados por Pinto et al., (2007), Hincapié & Veloza (2009), Moyano (2010), Morales et al., (2010), Gómez et al., (2014), IngeoExploraciones (2016) entre otros. En el estudio realizado por Pinto et al., (2007) se establece que las unidades con porosidad primaria altas corresponden con los Miembros Inferior y Superior de la Formación Los Santos, las unidades con porosidad secundaria corresponden a las rocas pertenecientes a las formaciones Silgará, Granito de Pescadero, Rosablanca, Girón; la Formación Tablazo presenta porosidad primaria y secundaria por fracturamiento y disolución.

Hincapié & Veloza (2009), en su descripción hidrogeológica sugieren que el flujo de agua subterránea en el área de estudio ocurre principalmente a través de fracturas en rocas sedimentarias de la Formación Los Santos, específicamente en las areniscas bien consolidadas y masiva, estableciendo que el Miembro Superior e Inferior posiblemente son acuíferos. Gómez et al., (2014)

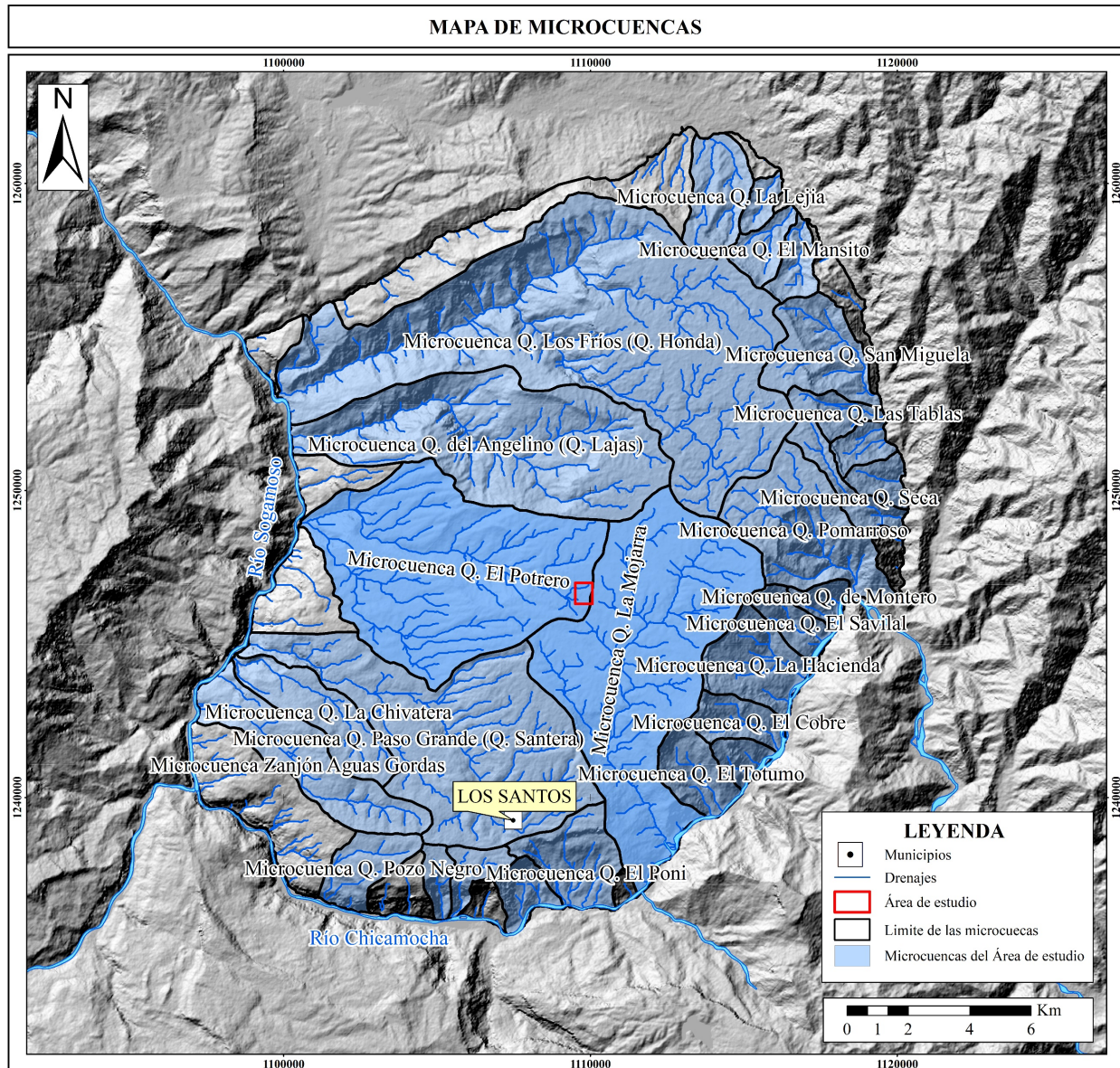
indican que en el norte de la Formación Los Santos se considera presente un acuífero, debido a la presencia de porosidad primaria, porosidad por microfracturas y disolución, así como porosidad secundaria que se manifiesta por diaclasas, así mismo indican que hacia el sur del Miembro Superior de la Formación Los Santos se presenta un alto grado de fracturamiento, y se encuentran diaclasas abiertas y ángulos de buzamiento NS de 80 a 90° por lo que esa zona puede considerarse como un acuífero fracturado.

IngeoExploraciones (2016) ha establecido que hidrogeológicamente la Mesa de Los Santos se comporta como un acuífero abierto que no presenta recarga lateral sino aparentemente por escorrentía e infiltración, siendo el aporte la precipitación característica de la región, que suministra las corrientes estacionarias, alimentando a los acuíferos superficiales o de los niveles freáticos presentes en las rocas alteradas o meteorizadas de la Formación Los Santos. De acuerdo con Becerra y Parra (2016) la precipitación en la zona está influenciada por su ubicación geográfica, pues se encuentra en la zona de convergencia intertropical (ZCIT). Esto significa que hay dos épocas secas durante el año, que ocurren entre diciembre y febrero, y entre junio y agosto. También hay dos épocas húmedas, que tienen lugar entre marzo y mayo, y entre septiembre y noviembre, es decir presenta un comportamiento bimodal.

Los principales ríos que conforman la red hidrográfica de la zona de interés son el Río Chicamocha y Río Sogamoso, así mismo la zona se compone de 8 microcuencas: Microcuenca de la quebrada la Honda, Los Angelinos, Del Potrero, Santera, Chivatera, Zanjon y Aguas Gordas correspondientes al río Chicamocha y las microcuencas Chinavega y La Mojarra que escurren hacia el río Chicamocha según el esquema de ordenamiento territorial EOT Los Santos, Santander (2003), siendo de principal interés la microcuenca El Potrero y La Mojarra para este proyecto de investigación pues son las más próximas a la zona de estudio (Figura 3).

Figura 3

Mapa de microcuencas de la Mesa de los Santos



5. Marco teórico

5.1 Fundamentos de hidrogeología

Agua subterránea: Se considera que el agua subterránea es aquella que se encuentra bajo la superficie del terreno y hace parte del ciclo hidrogeológico, su ocurrencia se da en varios tipos de espacios abiertos: intersticios entre granos, fisuras, grietas, fracturas, planos de foliación y estratificación, así como también en planos de falla y diaclasas. El agua permanece en movimiento debido a las diferencias de presión hidrostática y su existencia, movimiento y almacenamiento están controlados por la sucesión estratigráfica, espesores y la configuración estructural de los materiales que conforman la corteza terrestre (Vélez et al., 2011).

Unidad hidrogeológica: Corresponde a una o varias formaciones geológicas que tienen condiciones de permeabilidad y flujo aproximadamente constantes, es importante mencionar que en una misma formación geológica se pueden presentar varios tipos de acuíferos (Sánchez San Román, 2017).

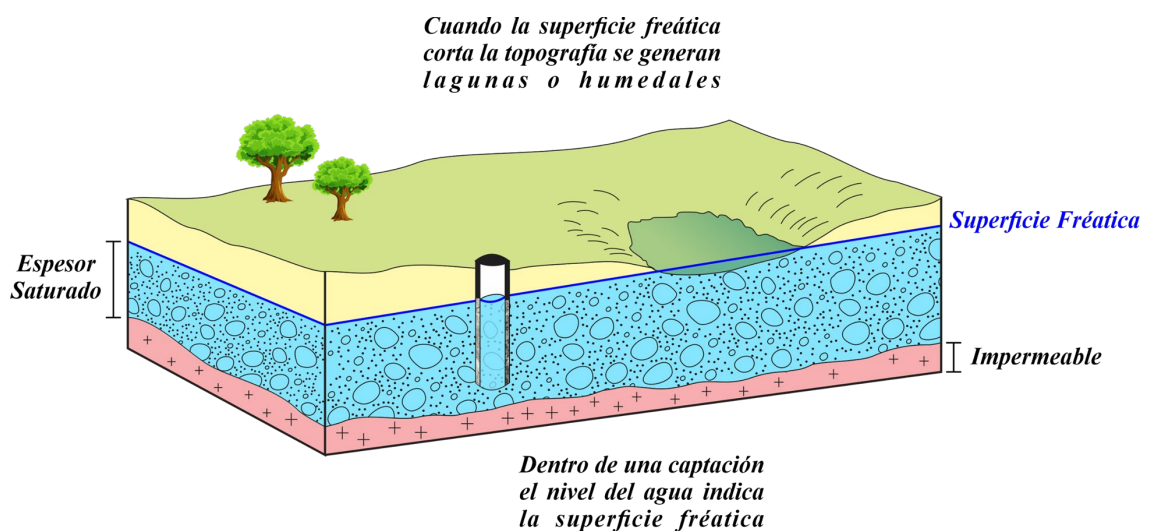
Acuíferos: Son rocas que almacenan agua y permiten su movimiento, esto es posible bajo la acción de la gravedad y diferencias de presiones, el agua almacenada en los acuíferos se puede explotar en cantidades relativamente apreciables. La importancia de los acuíferos radica en que se comportan como un embalse natural que puede almacenar agua durante las épocas de lluvia y ofrecerlas en épocas secas, son conductores de agua que la transportan desde las zonas de recarga hasta las zonas de abastecimiento y por último el medio poroso de los acuíferos puede ser un filtro natural para detener contaminante (Vélez et al., 2011). De acuerdo con las condiciones de presión

hidrostática a las que se encuentra sometida el agua almacenada en el acuífero se pueden presentar acuíferos libres, confinados y semiconfinados (Sánchez San Román, 2017).

- **Acuíferos libres, freáticos o no confinados:** Son aquellos que presentan una superficie libre de agua que está en contacto directo con la atmósfera, sometida por consiguiente a la presión atmosférica, dicha superficie se denomina superficie freática (Figura 4).

Figura 4

Acuífero libre



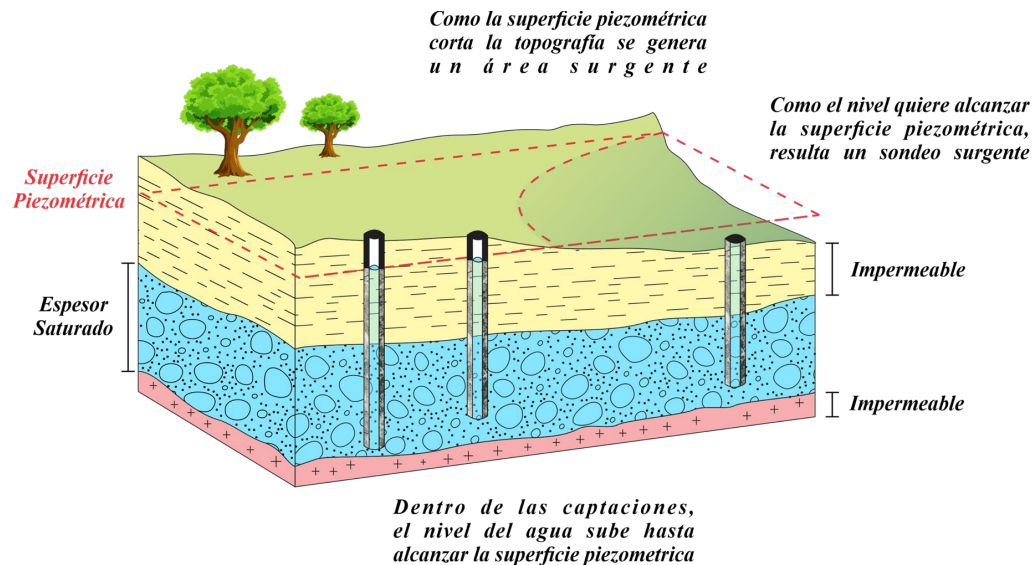
Nota. Tomado y Modificado de Sánchez San Román (2017)

- **Acuíferos confinados o cautivos:** En estos acuíferos el agua se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica y son formaciones permeables que son limitadas por capas impermeables. En este caso la formación se encuentra completamente saturada, Aquí no existe una superficie libre del agua, pero si puede

hablarse de una superficie piezométrica la cual es una superficie imaginaria que coincide con el nivel hidrostático del agua en el acuífero (Figura 5).

Figura 5

Acuífero confinado



Nota. Tomado y modificado de Sánchez San Román, (2017).

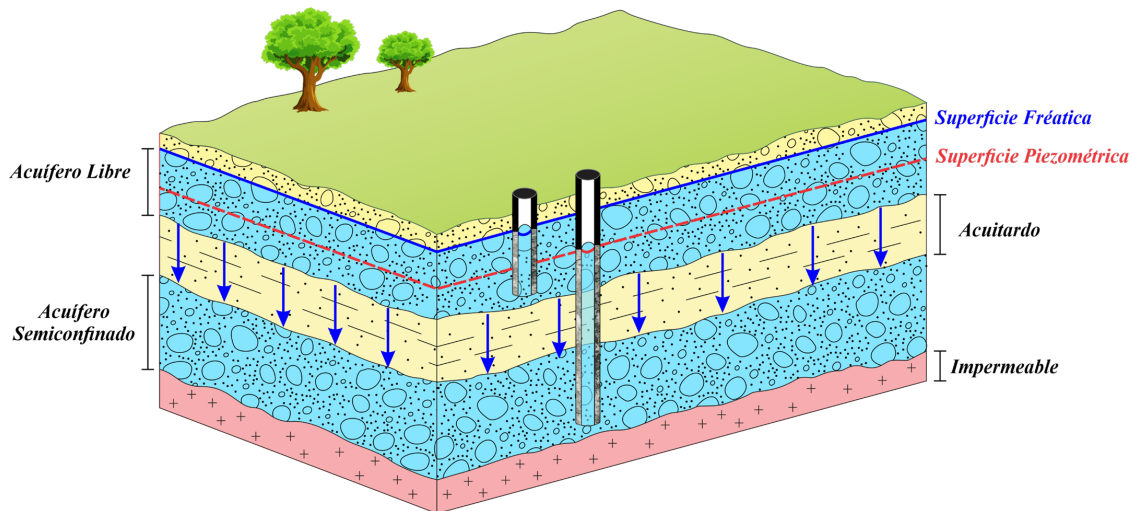
- **Acuíferos semiconfinados:** Rocas que están limitadas en su parte superior por un acuitardo y en su parte inferior por un acuitardo o por un acuifugo, donde el nivel de agua es llamado nivel piezométrico (Figura 6).

Porosidad: Es una propiedad fundamental de los acuíferos, ya que determina la capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea en el medio poroso. La porosidad se define como la proporción de espacio vacío en una roca o suelo en relación con su volumen total. Esta propiedad puede ser determinada a través de diversas técnicas de medición, como análisis

granulométricos o pruebas de permeabilidad (Freeze & Cherry, 1979). La porosidad de los acuíferos puede ser dividida en dos tipos: la porosidad primaria y la porosidad secundaria.

Figura 6

Acuífero semiconfinado



Nota. Tomado y modificado de: Sánchez San Román, (2017)

Porosidad primaria: La porosidad primaria se refiere a los espacios vacíos presentes en la roca o sedimento desde su origen, como los intersticios entre granos o la presencia de huecos y canales de origen biológico (Todd, 1980), es influenciada por diversos factores, como el tipo de sedimento, la tasa de sedimentación y la intensidad de la compactación.

Porosidad secundaria: Se genera a partir de procesos de disolución, erosión o fracturación en la roca o sedimento, lo que puede ampliar los espacios vacíos preexistentes o crear nuevos (Todd, 1980), puede ser afectada por diversos procesos geológicos, como la presencia de agua ácida en el subsuelo, la actividad sísmica o la erosión del agua subterránea en las rocas calcáreas. Estos procesos pueden ampliar las fisuras y fracturas preexistentes en la roca, generando nuevas cavidades y aumentando la porosidad secundaria (Freeze & Cherry, 1979).

Acuífero fracturado: Los acuíferos fracturados son un tipo de acuífero en el que la transmisión de agua subterránea se produce principalmente a través de fracturas, fisuras y grietas en la roca (Neuman, 1972). En los acuíferos fracturados la porosidad no es uniforme y la transmisión de agua subterránea se produce a través de conductos irregulares y no continuos en la roca. La conexión entre las fracturas puede ser muy variable, lo que dificulta la caracterización y modelización hidrogeológica de estos acuíferos (Fetter, 1994). Los acuíferos fracturados pueden presentar altas tasas de recarga y descarga de agua subterránea, y suelen ser muy sensibles a la contaminación debido a la rápida transmisión de contaminantes a través de las fracturas (Liu & Ouazar, 2003). La heterogeneidad de estos acuíferos puede generar grandes variaciones en la calidad del agua subterránea en distintos puntos del acuífero.

5.2 Fundamentos geofísicos

La geofísica es una ciencia que se encarga de obtener información del subsuelo a partir de variables físicas como la velocidad de ondas, la densidad de las rocas o la susceptibilidad magnética, entre otras. Se requiere una adquisición de datos en campo, para posteriormente procesar y analizar esta información geofísica junto con datos de otras geociencias. De esta forma, se puede obtener una interpretación integrada que permita la generación de modelos geológicos lógicos (Lowrie, 2007).

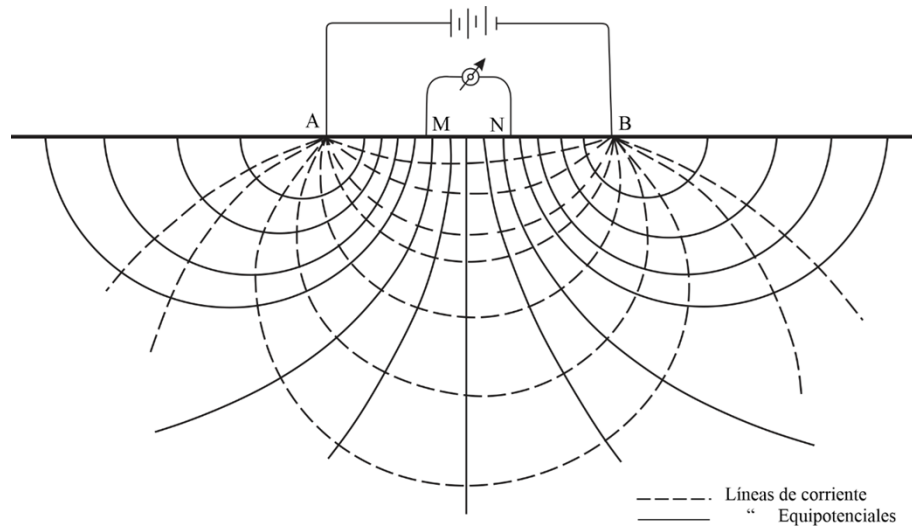
5.2.1 Método Geoeléctrico

En el esquema básico de los métodos de resistividad se utiliza un estímulo eléctrico de corriente artificial que consiste en emitir al terreno una corriente continua a través de un par de electrodos emisores (A y B), y se mide la diferencia de potencial en otros dos electrodos receptores

(M y N) (Figura 7). El método geoelectrico utilizado para este estudio es la tomografía de resistividad eléctrica (TRE).

Figura 7

Configuración básica en estudios de Resistividad Eléctrica



Nota. Tomado de Cantos, J. (1974).

5.2.1.1 Tomografía De Resistividad Eléctrica (TRE). Es un método de resistividad multielectrónico, basado en la modelización 2D de la resistividad del terreno, tanto lateralmente como en profundidad (Muñoz, 2021).

A rasgos generales, consiste en introducir en el terreno una corriente eléctrica de intensidad conocida, a través de unos electrodos clavados a lo largo de un perfil de forma equidistante. A partir de la intensidad de esta corriente y de la diferencia de potencial observada, el instrumento proporciona el valor de la resistividad aparente (llamada así porque no es la resistividad real) en puntos situados a lo largo del perfil de observación y a distintas profundidades. Posteriormente, se

lleva a cabo la inversión numérica (mediante un software de inversión) de la resistividad aparente para obtener la distribución de la real (Muñoz, 2021).

A continuación, se presentan las bases teóricas de este método:

Ley de Ohm: El flujo de una corriente eléctrica a través de las rocas o los sedimentos puede explicarse mediante la Ley de Ohm que establece que la intensidad de corriente eléctrica transportada por un conductor es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a su resistencia eléctrica, y así como lo indica la ecuación 1:

$$I = \frac{V}{R} , \quad (1)$$

donde **I** es la intensidad de la corriente en amperios, **V** es la diferencia de potencial eléctrico en voltios, **R** es la resistencia eléctrica en Ohm.

Resistividad eléctrica: La resistividad eléctrica se define como la resistencia específica que presenta un determinado material a oponerse a la corriente eléctrica. Cuando se introduce una corriente eléctrica en el terreno, ésta se puede propagar de tres maneras diferentes a través del subsuelo: conducción dieléctrica (asociada a materiales muy poco conductivos o aislantes), conducción electrónica (asociada a materiales con electrones libres) y conducción electrolítica (asociada al movimiento de los iones presentes en el fluido intersticial del terreno). La conducción electrolítica es el modo de propagación más importante, y en el que se basa los métodos de resistividad (Molina, 2018).

La resistividad eléctrica específica (ρ) se expresa mediante la ecuación 2:

$$\rho = \frac{(R * A)}{L} , \quad (2)$$

donde ρ es la resistividad eléctrica (Ohm*m), **R** es la resistencia del material (Ohm), **A** es el área del material (m²), **L** es la longitud del material (m).

En un semiespacio homogéneo e isótropo de resistividad ρ , y sometido a una intensidad I , el valor del potencial V de un punto situado a una distancia r con respecto a un electrodo puntual esta dado por la ecuación 3:

$$V = \frac{I * \rho}{2\pi r} , \quad (3)$$

para introducir la corriente es necesario que exista otro electrodo B (Figura 14), por el cual el potencial generado en un punto M, será igual al producido por A, menos el producido por B entonces partiendo de la anterior ecuación, el potencial medido por los electrodos de medida M y N será expresado mediante la ecuación 4:

$$V_M = \frac{I * \rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right]; V_N = \frac{I * \rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right] , \quad (4)$$

se tendrá como diferencia de potencial entre los dos puntos lo siguiente, como lo indica la ecuación 5:

$$\Delta V_{MN} = \frac{I * \rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] , \quad (5)$$

despejando ρ se tiene el valor de la resistividad para el punto medio del dispositivo y va a depender de un material determinado, entonces la formula anterior queda reducida a la ecuación 6:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} * K , \quad (6)$$

donde ρ se mide en Ohmios-metro, I en Amperios, V en Voltios, y K es el “factor de penetración” o “coeficiente del dispositivo” y depende de las distancias entre los electrodos, además del método de resistividad que se utilice (Molina, 2018).

A continuación, se presenta los valores de K para las principales configuraciones electrónicas (Tabla 1):

Tabla 1

Valores de K para las principales configuraciones electrónicas.

Configuración Electrónica	Valores de K
Wenner	$K = 2\pi a$
Schlumberger	$K = \frac{(2\pi(b + a) - a)}{a}$
Wenner – Schlumberger	$K = \pi n(n + 1)a$

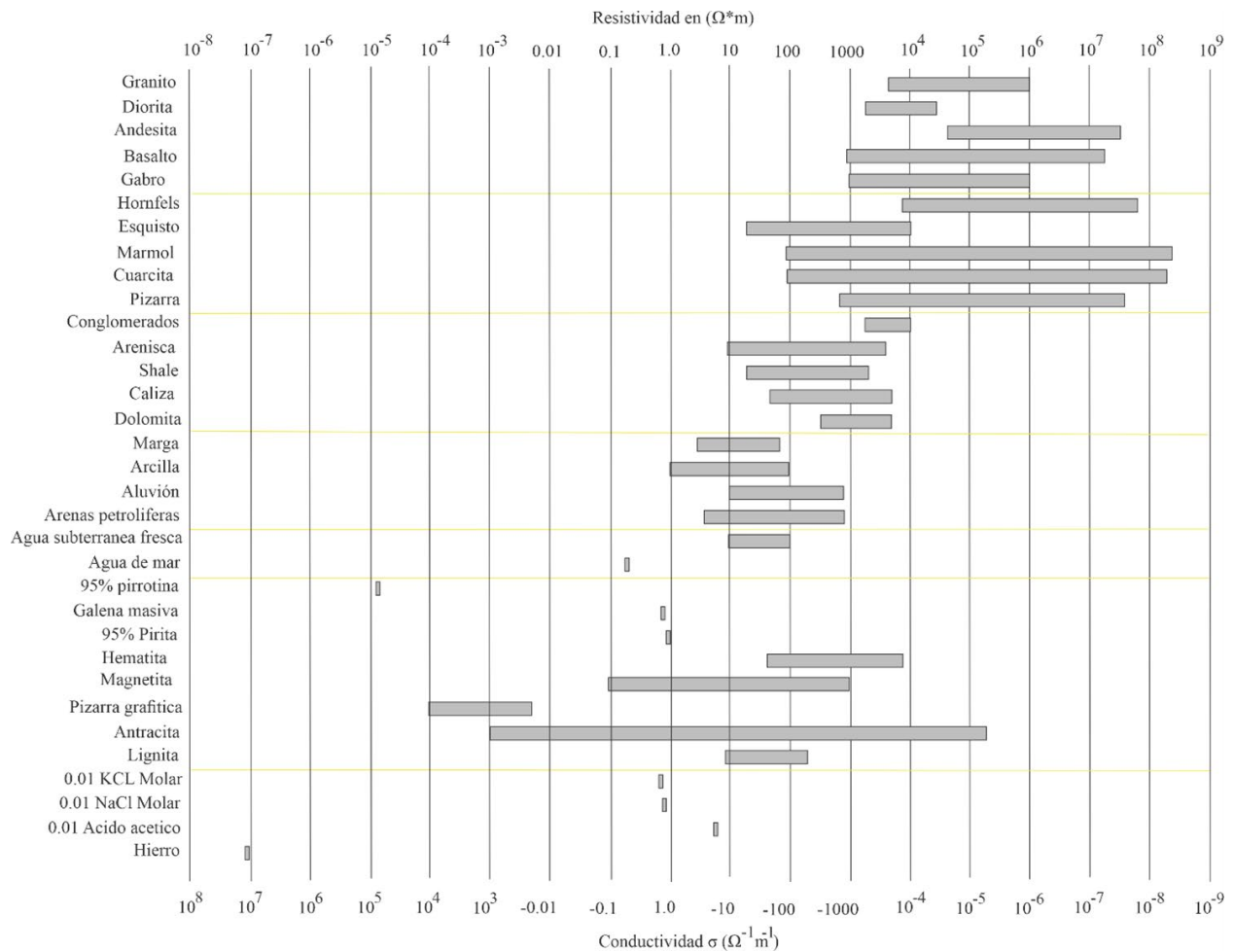
Nota. Tomada de Molina Calvo, A. (2018).

Las resistividades obtenidas van a depender de diversos factores como: el contenido de agua, tamaño de grano, porosidad grado de cementación.

La Figura 8 presenta algunos típicos de resistividades/conductividades eléctricas de materiales terrestres y minerales.

Figura 8

Rangos típicos de resistividades/conductividades eléctricas de rocas, suelos y minerales



Nota. Tomado de Loke, M. H. (2004).

Existen múltiples arreglos para realizar tomografías de resistividad eléctrica entre los cuales se encuentran: dipolo-dipolo, Wenner, Schlumberger, entre otros, la disposición geométrica de los electrodos será el factor que diferencie estos arreglos entre sí.

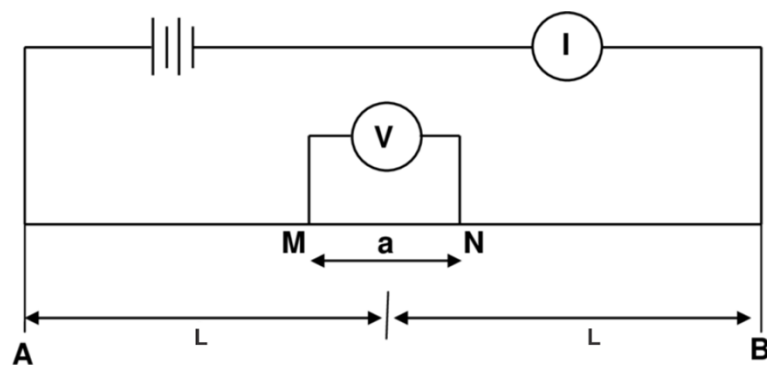
Arreglo Schlumberger

Es esta configuración se debe cumplir con la condición de que la distancia que separa a AB debe ser mayor o igual que 5MN, es decir los electrodos de corriente están separados a una

distancia mayor que los electrodos de potencial (Figura 9), la distancia de cada electrodo de corriente al punto medio del arreglo se denomina L y la separación de electrodos de potencia se denomina a . Este arreglo es muy útil cuando se requiere que las resoluciones del terreno tanto en la vertical como en la horizontal sean buenas.

Figura 9

Disposición geométrica del arreglo de Schlumberger



Nota. Tomado de Anomohanran, O. (2013).

Arreglo Wenner

En esta configuración los electrodos (A-B) y (M-N) se ubican equidistantes entre sí a una distancia a (Figura 10A). Este arreglo es útil para cuando se requieren resoluciones verticales buenas y en tiempos limitados.

Arreglo Wenner- Schlumberger

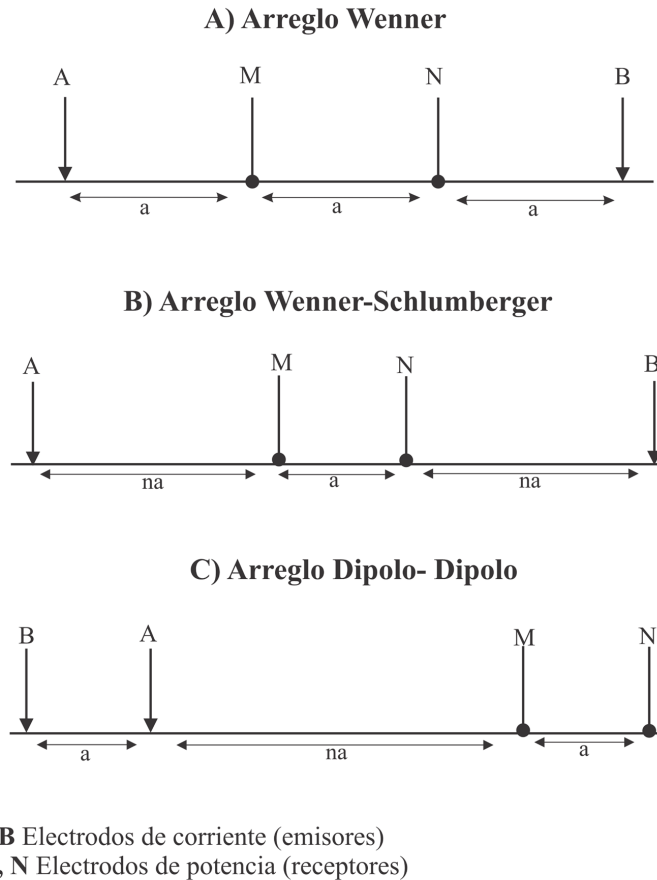
En esta configuración se combina la resolución vertical de Wenner con la resolución horizontal de Schlumberger, en este arreglo se instalan los cuatro electrodos a una distancia constante y la separación de los mismo va a ir aumentando a medida que aumenta el valor n (Figura 10B) (Vargas, 2015). Esta configuración brinda información en la resolución vertical y horizontal.

Arreglo dipolo- dipolo

En este arreglo las distancias AB y MN se van a mantener constantes pero cada par de electrodos van a estar separados a una distancia n (Figura 10C). Este arreglo es usando cuando se requiere una buena resolución horizontal, además es la vertical puede ayudar a detectas estructuras como cavidades o cuerpos mineralizados.

Factores que afecta la resistividad: la resistividad eléctrica es un parámetro que varía en función de las características del terreno, entre los factores que la afectan según Molina 2018 se encuentran:

- El grado de saturación del terreno.
- La temperatura.
- Porosidad y la forma de los poros.
- La salinidad del fluido.
- El tipo de roca.
- Los procesos geológicos que afectan a los materiales.
- La presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico.
- La relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno es lo que permite el utilizar estos métodos de resistividad en la búsqueda de focos de filtración de agua en el subsuelo. Por lo que incrementos del contenido en agua del terreno provocarán disminuciones de la resistividad (Molina, 2018).

Figura 10*Representación gráfica de los diferentes arreglos*

Nota. A) Configuración del arreglo Wenner. B) Configuración del arreglo Wenner-Schlumberger.

C) Configuración del arreglo dipolo-dipolo. Adaptado de: Al-Amoush et., al (2017)

La resistividad de la mayoría de las rocas y sedimentos secos es elevada, por lo que actúan como semiconductores, o conductores de baja capacidad. Este comportamiento cambia significativamente cuando las fisuras o los poros están ocupados por agua, lo que genera una disminución de la resistividad. Los contrastes en las resistividades son los que permiten aplicar exitosamente los métodos de prospección geoelectrónica mediante la inyección de corrientes continuas (Auge, 2008)

En rocas compactas (las que deben su permeabilidad a la ocurrencia de discontinuidades) se buscarán las resistividades bajas, ya indicarán las zonas en las que la formación presenta la mayor fracturación y/o alteración. En este caso también puede ocurrir que las zonas o niveles de menor conductividad tampoco sean permeables si los planos de fracturación han sido colmatados por arcillas de alteración (Arias, 2011).

Hincapié & Veloza (2009) han establecido rangos de resistividad asociados a los tipos de rocas existentes en las unidades geológicas presentes en la Mesa de Los Santos las cuales se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2

Rangos de resistividad asociados a los tipos de roca existentes

Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Interpretación
1 a 5	Arcillas, margas, arcillolitas y limolitas saturadas, suelos residuales saturados.
5 a 12	
12 a 30	
30 a 80	Arcillolitas y limolitas moderadamente saturadas. Areniscas altamente fracturadas saturadas.
80 a 200	Areniscas fracturadas con media saturación de agua. Calizas fracturadas saturadas.
200 a 490	Areniscas fracturadas con media a moderada saturación de agua. Calizas moderadamente saturadas.
490 a 1220	Areniscas moderadamente fracturadas y/o con moderada a baja saturación de agua. Calizas con baja saturación y fracturamiento

1220 a 3050	Areniscas pobremente fracturadas con baja saturación de agua. Calizas masivas.
3050 a 7630	Areniscas masivas secas a pobremente saturadas.
Mayores a 7630	Rocas masivas secas.

Nota. Los rangos de resistividades corresponden a los tipos de rocas preexistentes en la Mesa de Los Santos. Tomado y modificado de: *Informe Hidrogeológico de la Mesa De Los Santos* por Hincapié & Veloza (2009).

5.2.2 Métodos Sísmicos

Se basan en la emisión y recepción de ondas sísmicas artificiales que son generadas en la superficie. Estas ondas se transmiten hacia el interior de la Tierra en forma de ondas sísmicas y regresan a la superficie después de haber sido reflejadas o refractadas por las discontinuidades que se encuentran en el subsuelo. La transmisión de las ondas está influenciada por las características geomecánicas del subsuelo, en particular por los contrastes de velocidad de propagación y densidad de los cuerpos rocosos (Lowrie, 2007).

Las ondas sísmicas son una forma de energía elástica que se propaga a través del subsuelo a velocidades que dependen de las propiedades físicas del medio por el cual se desplazan. Estas propiedades incluyen la densidad del material y el módulo de elasticidad. En función de estas variables, las ondas pueden viajar a diferentes velocidades y su trayectoria puede ser afectada por cambios en la composición del subsuelo (Lazcano, 2007).

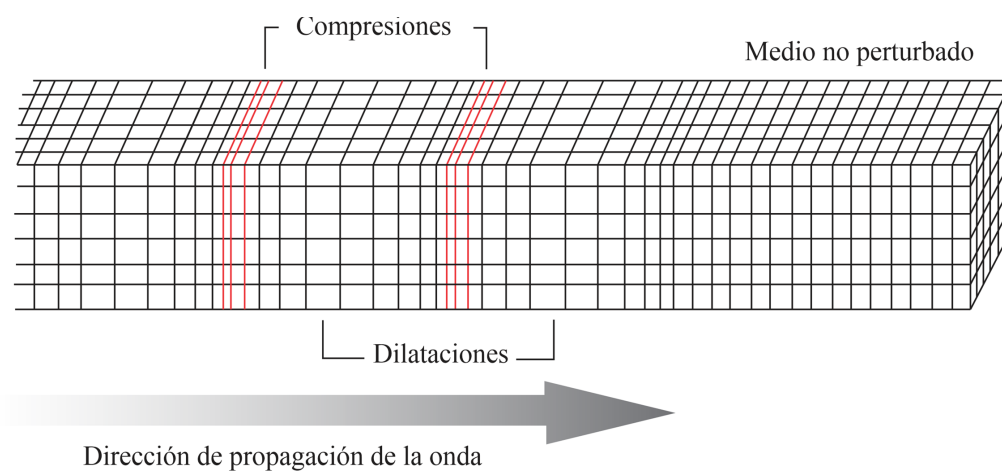
Existen dos tipos principales de ondas sísmicas: ondas de cuerpo, y ondas de superficie. Las ondas de cuerpo se dividen en dos tipos: ondas primarias y ondas secundarias. Las ondas primarias (también conocidas como ondas P) son ondas de compresión que se propagan a través

de los materiales del interior de la Tierra, mientras que las ondas secundarias (también conocidas como ondas S) son ondas de corte que se propagan perpendicularmente a las ondas primarias. Por otro lado, las ondas de superficie se dividen en dos tipos: ondas Rayleigh y ondas Love. Las ondas Rayleigh son ondas que se propagan a través de la superficie y tienen un movimiento de rotación, mientras que las ondas Love son ondas transversales que se propagan en la interfaz entre dos medios con diferentes propiedades elásticas (Maggi y Priestley, 2005).

Ondas primarias: También llamada onda dilatacional, longitudinal, irrotacional, compresional u Ondas P, este último nombre se debe a un hecho particular, pues durante un evento sísmico estas ondas son las primeras en registrarse en el punto de observación y tienen una amplitud relativamente pequeña y periodo corto. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad entre 70 y 140% mayor que las ondas S (Lazcano, 2007) y generan un movimiento de partículas en la dirección de propagación, comprimiendo y dilatando el medio por el cual se propagan, como se indica en la Figura 11.

Figura 11

Esquema de propagación de onda P



Nota. Tomado de The Worlds of David Darling.

Clasificación del perfil del suelo considerando la velocidad de onda P: La Normativa Internacional, para la ejecución del método de Refracción Sísmica, ASTM D5777 00(2011) “Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation” establece una clasificación de los suelos basada en la velocidad de onda P, la cual se obtiene a partir de ensayos sísmicos y se muestra a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3

Clasificación de los perfiles de suelo considerando los valores de velocidad de onda P según la Norma ASTM D5777

Descripción	Velocidad de onda P (m/s)
Material Superficial meteorizado	240 – 610
Grava o arena seca	460 – 915
Arena (Saturada)	1220 – 1830
Arcilla (Saturada)	915 – 2.750
Agua*	1430 – 1665
Agua de mar*	1460 – 1525
Arenisca	1830 – 3960
Lutita	2750 – 4270
Yeso	1830 – 3960
Caliza	2134 – 6100
Granito	4575 – 5800
Roca Metamórfica	3050 – 7000

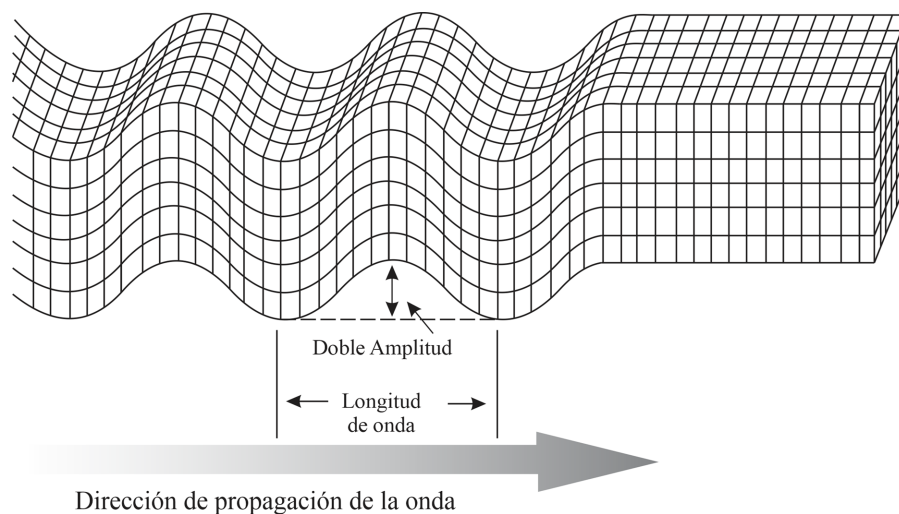
Nota. *Depende de la temperatura y el contenido de sales.

Tomado de: ASTM D5777 - 11e1. (2011).

Ondas Secundarias: Las ondas S o secundarias, también llamadas onda cortante, transversal, rotacional o de cizallamiento, son ondas mecánicas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación (Figura 12). Su velocidad es menor que la de las ondas primarias. Razón por lo que estas aparecen en el terreno después que las primarias. Estas ondas son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y solo se trasladan a través de elementos sólidos, debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Su velocidad es alrededor de 59% de la de una onda P para cualquier material sólido (Avilés & Barzallo, 2016).

Figura 12

Esquema de propagación de onda S



Nota. Tomado de The Worlds of David Darling.

Clasificación del perfil del suelo considerando la velocidad de onda S: De acuerdo con el valor promedio de V_{530} , el Reglamento colombiano de construcción sísmo resistente establece un tipo de perfil de suelo, los parámetros definidos en la norma NSR10 se muestran en la Tabla 4 y se utilizan para definir el tipo de perfil de suelo con base en los 30 m superiores del mismo y considerando ensayos realizados en muestras tomadas al menos cada 1.50 m de espesor del suelo.

Estos parámetros son la velocidad media de la onda de cortante, V_s , en m/s , el número medio de golpes del ensayo de penetración estándar, N , en golpes/pie a lo largo de todo el perfil, o, cuando se trate de considerar por separado los estratos no cohesivos y los cohesivos del perfil, para los estratos de suelos no cohesivos se determinará el número medio de golpes del ensayo de penetración estándar, N_{ch} , en *golpes/pie*, y para los cohesivos la resistencia media al corte obtenida del ensayo para determinar su resistencia no drenada, s_u , en kPa . Además, se emplean el Índice de Plasticidad (IP), y el contenido de agua en porcentaje, w . (MAVDT, 2010).

De acuerdo con los parámetros establecidos en la norma NSR 10, la velocidad media de la onda de corte V_s se obtiene por medio de la ecuación 7:

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}}, \quad (7)$$

donde V_{si} es la velocidad media de la onda cortante del suelo del estrato i , medida en campo en m/s , d_i es el espesor del estrato i , localizado dentro de los 30 m superiores del perfil y $\sum_{i=1}^n d_i$ es siempre igual a 30 m.

Tabla 4

Clasificación de los perfiles de suelo considerando los valores de velocidad de onda de corte promedio a 30 metros según la Norma Sismo Resistente NSR10

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente.	$\bar{V}_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media.	$1500 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 760 \text{ m/s}$

C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante.	$760 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda que cumpla con cualquiera de los dos criterios.	$\bar{N} \geq 50$ $\bar{S}_u \geq 100 \text{ KPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2)$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante.	$360 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones.	$50 > \bar{N} \geq 15$ $100 \text{ KPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{S}_u \geq 50 \text{ KPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda cortante.	$180 \text{ m/s} > \bar{V}_s$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $50 \text{ KPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{S}_u$
	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases:	
F	F1 — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2 — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3 — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75)	
	F4 — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Nota. Tomada de MAVDT. (2010).

Ondas de superficie: Cuando se golpea en la se generan ondas elásticas, 67% de la energía aplicada se propaga como ondas Rayleigh, 27% como ondas secundarias y 7% como ondas primarias (Woods, 1968).

Las ondas superficiales se propagan cuando las ondas internas o de volumen alcanzan un sólido que posee una superficie libre, como la superficie de la tierra, propagándose a lo largo de dicha discontinuidad. Se propagan más lentamente que las ondas de volumen y alcanzan amplitudes de varios centímetros. Su afección en profundidad depende de la longitud de la onda. Se caracterizan por ser dispersivas, teniendo un comportamiento individual de cada onda en su propagación en un frente de ondas, en función de su longitud de onda o su frecuencia (Álvarez, 2015). Pueden alcanzar amplitudes muy largas en la superficie, pero decaen exponencialmente con la profundidad. Tienen la particularidad de ser más complejas en cuanto al registro de las ondas, ya que estas pueden reflejarse y refractarse varias veces de modo que pueden cambiar de tipo de onda.

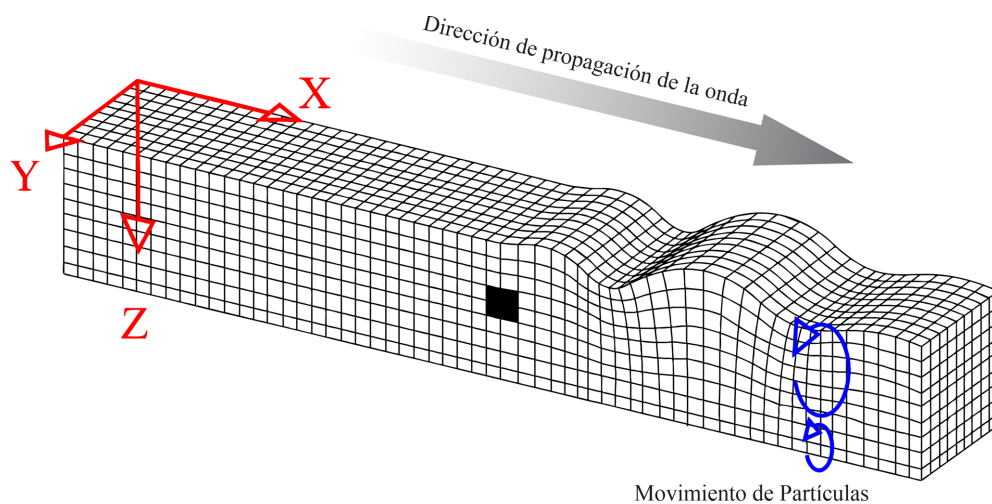
Ondas de Rayleigh: Se empiezan a transmitir alrededor del epicentro o proyección del foco sobre la superficie terrestre. Este tipo de ondas tienen su máxima amplitud en la superficie libre, la cual decrece exponencialmente con la profundidad. Son más lentas que las ondas de cuerpo y su velocidad de propagación es casi un 70% de la velocidad de las ondas S. La trayectoria que describen las partículas del medio al propagarse la onda es elíptica retrograda y ocurre en el plano de propagación de la onda (Bran, Gonzáles, & Ortiz, 2009).

Tienen un movimiento similar al de las ondas de la superficie del agua, haciendo vibrar las partículas sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimientos elípticos y verticales simultáneamente. La Figura 13 describe la trayectoria y deformación que experimenta una partícula bajo la influencia de una onda Rayleigh.

En un depósito de suelo perfectamente homogéneo, la onda Rayleigh viajara a una velocidad que es independiente de su longitud de onda. Sin embargo, en el suelo hay estratos con rigideces, densidades o relaciones de (Matthews, Hope, & Clayton, 1996) Poisson variables, entonces la velocidad de la onda de Rayleigh dependerá de su longitud de onda. Cuando la velocidad de los componentes de onda depende de la frecuencia, se dice que la onda es dispersiva. Este comportamiento que exhiben las ondas Rayleigh en materiales no uniformes es el principio en el que se fundamentan los diferentes métodos de análisis de onda de superficie (Matthews, Hope, & Clayton, 1996).

Figura 13

Esquema de propagación de onda Rayleigh



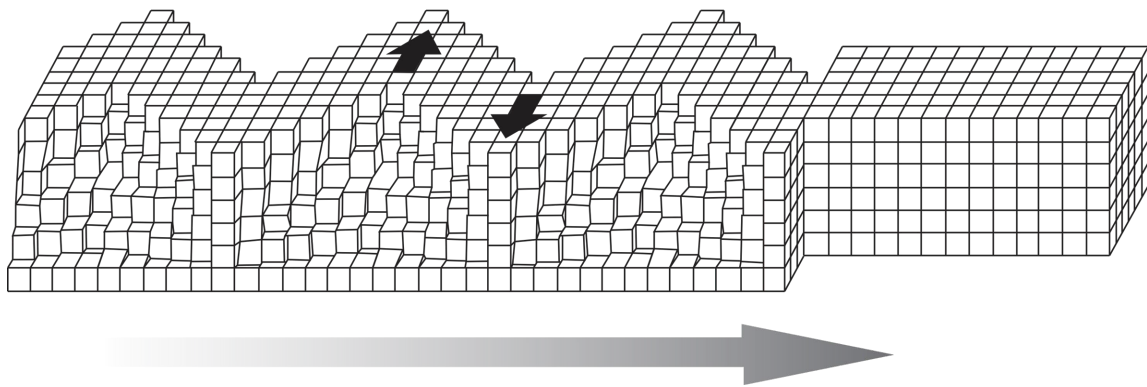
Nota. Tomado de The Worlds of David Darling.

Ondas Love: La velocidad de las ondas Love es un 90% de la velocidad de las ondas S y es ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh. Estas se generan solo cuando un medio elástico se encuentra estratificado. Se propagan en forma similar que las ondas S haciendo vibrar las partículas horizontalmente en sentido perpendicular al de propagación, pero sin movimiento vertical. Las ondas Love puede considerarse como ondas S “atrapadas” en la

superficie. La trayectoria que describen las partículas del medio al propagarse la onda es elíptica retrograda y ocurre en el plano de la propagación de la onda (Figura 14) (Bran, Gonzáles, & Ortiz, 2009).

Figura 14

Esquema de propagación de onda Love



Nota. Tomado de The Worlds of David Darling.

A partir de estas definiciones, es posible distinguir dos tipos de estudios sísmicos: la sísmica de reflexión y la sísmica de refracción, siendo esta última la que se utilizó en el presente proyecto.

5.2.2.1 Método de Refracción Sísmica. Es una técnica geofísica no invasiva que se utiliza para determinar la estructura del subsuelo a partir del análisis de las ondas sísmicas. Este método se basa en la medición del tiempo de llegada de las ondas sísmicas que se reflejan y refractan en las diferentes capas del subsuelo. La velocidad de propagación de estas ondas depende de la densidad y elasticidad de las capas que atraviesan. Por lo tanto, la medición del tiempo de llegada de estas ondas permite determinar la profundidad y la velocidad de propagación de cada una de las capas del subsuelo (Dobrin & Savit, 1988).

Los principios y leyes físicas implícitas en el comportamiento de las ondas necesarias para entender el comportamiento de las ondas sísmicas son:

Ley de Snell: El ángulo de refracción depende de la rapidez de la luz en los dos medios y del ángulo de incidencia. Hacia 1621, Willebord Snell (1591-1626) determinó experimentalmente una relación analítica entre θ_1 y θ_2 . Se le conoce como la Ley de Snell y se escribe

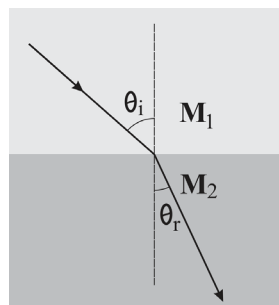
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (8)$$

θ_1 es el ángulo de incidencia y θ_2 es el ángulo de refracción; n_1 y n_2 son los respectivos índices de refracción en los materiales.

La ley de Snell establece que cuando la velocidad de la luz cambia al pasar de un medio a otro con índices de refracción diferentes, el ángulo de incidencia del rayo de luz también cambia (Figura 15). Si el índice de refracción del segundo medio es mayor que el del primer medio, el rayo de luz se doblará hacia la normal en el punto de incidencia. En cambio, si el índice de refracción del segundo medio es menor que el del primer medio, el rayo de luz se doblará alejándose de la normal (Giancoli, 2006).

Figura 15

Esquema de la Ley de Snell mostrando la interface entre dos medios diferentes

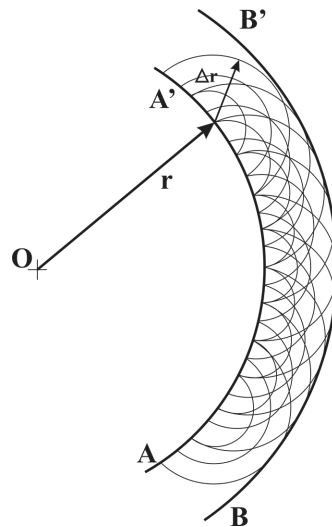


Nota. Tomado de Bromberg, S., & Rivaud, J. J. (2001).

Principio de Huygens: El principio de Huygens es un concepto fundamental en la teoría de ondas que permite determinar la posición de un nuevo frente de onda en un instante dado utilizando información del frente de onda anterior. Esta técnica se basa en la idea de que cada punto en un frente de onda actúa como una fuente de ondas esféricas secundarias que se propagan en todas las direcciones a través del medio. Después de un período de tiempo, la nueva posición del frente de onda se determina como la superficie tangente a estos trenes de ondas (Figura 16). Esto permite una descripción precisa de la propagación de las ondas y ha sido fundamental en la comprensión de muchos fenómenos físicos, desde la difracción hasta la reflexión y la refracción de la luz y el sonido (Serway & Jewett, 2009).

Figura 16

Representación del principio de Huygens



Nota. Tomado de Llinares Galiana, J., Llopis Reyna, A., Vendrell, S., & Javier, F. (1996).

5.2.2.2 Análisis Multicanal De Ondas Superficiales (MASW). La técnica de análisis multicanal de ondas superficiales es un método sísmico que se emplea para medir la velocidad de las ondas sísmicas superficiales en el subsuelo, a través del análisis de la dispersión de las ondas

Rayleigh. La dispersión se produce debido a la naturaleza dispersiva del suelo, donde una onda superficial se puede separar en paquetes de frecuencia diferentes, cada uno de los cuales tiene una velocidad de fase distinta. Durante el proceso de análisis, la onda Rayleigh se descompone para cada registro, se calculan los espectros de energía y se extraen las curvas de dispersión del modo fundamental y, si es posible, de los modos superiores de vibración (Serna Vásquez, 2015).

5.3 Módulos elásticos

Los parámetros dinámicos del suelo son esenciales para comprender su comportamiento ante la acción de cargas dinámicas, como las producidas por sismos, vibraciones de maquinarias o tráfico vehicular. Entre estos parámetros se encuentran la rigidez, el amortiguamiento, la densidad, la velocidad de propagación de las ondas sísmicas y otros que pueden influir en la respuesta del suelo (Seed et al., 1986).

El coeficiente de Poisson, representado por la letra σ , es una medida de la relación entre las deformaciones laterales y axiales de un material. Es decir, mide la contracción transversal que sufre un material cuando se somete a una carga axial. En el caso del suelo, el coeficiente de Poisson se ve afectado por factores como la densidad, la porosidad y la estructura interna del suelo, es una magnitud adimensional, es decir, no tiene unidades (Kramer, 1996).

La densidad del suelo es otra propiedad dinámica importante, ya que influye en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas y, por tanto, en la respuesta del suelo ante un sismo (Seed et al., 1986).

La rigidez del suelo se refiere a la resistencia que ofrece el suelo a las deformaciones causadas por una carga externa. Esta propiedad se puede medir a partir del módulo de cizalla G , el cual se calcula mediante correlaciones con la velocidad de ondas sísmicas (Seed et al., 1986).

El módulo de Young, representado por la letra E , es una medida de la rigidez de un material, es decir, la resistencia que ofrece a la deformación elástica bajo la aplicación de una carga. En el caso del suelo, el módulo de Young puede variar significativamente en función de la densidad, la humedad y la composición mineralógica de los granos de suelo (Kramer, 1996).

El módulo de Bulk es una propiedad elástica del suelo que se refiere a su capacidad para resistir cambios en su volumen en respuesta a cambios en la presión. Se define como el cambio en la presión hidrostática dividida por el cambio en el volumen específico. Es una propiedad importante en la caracterización de suelos, ya que puede influir en la capacidad de carga y la estabilidad de estructuras construidas sobre ellos (Coduto, 2011).

5.3.1 Estimación de los parámetros elásticos en función de la velocidad de onda tipo P y S.

La estimación de los parámetros dinámicos: Modulo de Poisson (σ), el parámetro de Rigidez (G), el módulo de Young (E), y el módulo o parámetro de Bulk (K) se estimaron en la posición central de las líneas sísmicas realizada, se consideró el sistema de unidades de entrada en MKS (Metros, Kilogramos, Segundos), de esta manera las unidades de los módulos fueron en Pascales. Las relaciones utilizadas para calcular estos parámetros son las siguientes:

Para el **módulo de Poisson** se utilizó la expresión (9) encontrada en Telford, W. M (1990):

$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad (9)$$

donde V_p , es la velocidad de onda tipo P, y V_s , es la velocidad de onda tipo S, obtenidas de los ensayos geofísicos indirectos.

La densidad del medio se puede determinar a partir de la relación expresada en la ecuación 10 se cumple para rocas sedimentarias, basada en Gardner (1974):

$$\rho = 0.23 V_p^{0.25} , \quad (10)$$

donde las unidades de densidad obtenida son gr/cm^3 , para esta expresión (11) velocidad de onda P debe estar en ft/s , de estar V_p en m/s se debe usar:

$$\rho = 0.31 V_p^{0.25} , \quad (11)$$

la densidad obtenida se debe convertir a kg/m^3 .

Para el caso del **módulo de Rigidez (G)** la relación está dada por la formula (12):

$$G = \rho V_s^2 \quad (12)$$

donde ρ , es la densidad del medio en kg/m^3 .

Para el **módulo de Young (E)**, la expresión a usar es la mostrada en la ecuación (13):

$$E = 2G(1 + \sigma) , \quad (13)$$

el **módulo de Bulk (K)**, esta expresado por la relación (14):

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\sigma)} . \quad (14)$$

6. Metodología

Para el desarrollo del proyecto de investigación y validación de la hipótesis a la pregunta de investigación se ejecutó una metodología en tres etapas. Se inició con la consulta bibliográfica para la selección de los métodos más idóneos en la solución del problema planteado (Etapa pre-campo), posterior se realizó la adquisición de datos en un predio de la vereda La Fuente (Etapa de campo), estos datos fueron procesados e interpretados para la generación de modelos esquemáticos del subsuelo que ejemplificaran el comportamiento del nivel freático en el área de estudio (Etapa de oficina).

6.1 Etapa de pre-campo: Determinación de contrastes en el subsuelo.

En esta etapa se realizó la búsqueda, selección y organización de información secundaria de estudios anteriores correspondientes a trabajos de grado, artículos en revistas científicas, informes de corporaciones de gobierno (INGEOMINAS), entre otras fuentes de interés científico de información geológica, geofísica e hidrogeológica de la Mesa de Los Santos. Con el entendimiento general de la problemática en la Mesa de Los Santos respecto al acceso del recurso hídrico subterráneo, se realizó una salida de reconocimiento la cual abarcó una identificación de las vías de acceso para la localización de un punto de estudio, durante esta salida se hizo un acercamiento con la comunidad para dar a conocer el objetivo del proyecto de investigación y gestión de los permisos correspondientes para el área seleccionada.

Para determinar contrastes en las propiedades física del subsuelo producto a la presencia o ausencia de agua se optó la prospección conjunta de los métodos geofísicos de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), Refracción Sísmica (RS) y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW). Se planteó un diseño preliminar para cada uno de los métodos geofísicos

considerando los estudios realizados por otros autores en la Mesa de Los Santos y, estos diseños fueron validados e implementados en la etapa de campo. En el caso del método de Refracción Sísmica, ensayo MASW1D y MASW2D se realizó un esquema de los puntos de disparo por cada línea para definir los golpes y su localización respecto a los geófonos teniendo en cuenta que estos deber ser equidistantes (Figura 17, 18 y 19), para optimizaciones en tiempos de adquisición.

Figura 17

Diseño de adquisición de la línea 1 para la Tomografía de Refracción Sísmica, MASW1D y MASW2D.

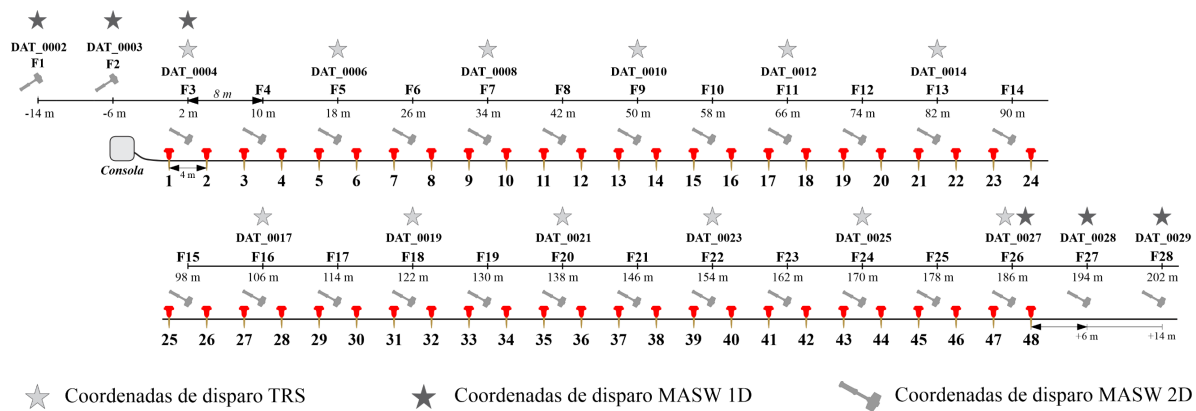


Figura 18

Diseño de adquisición de la línea 2 para la Tomografía de Refracción Sísmica, MASW1D y MASW2D.

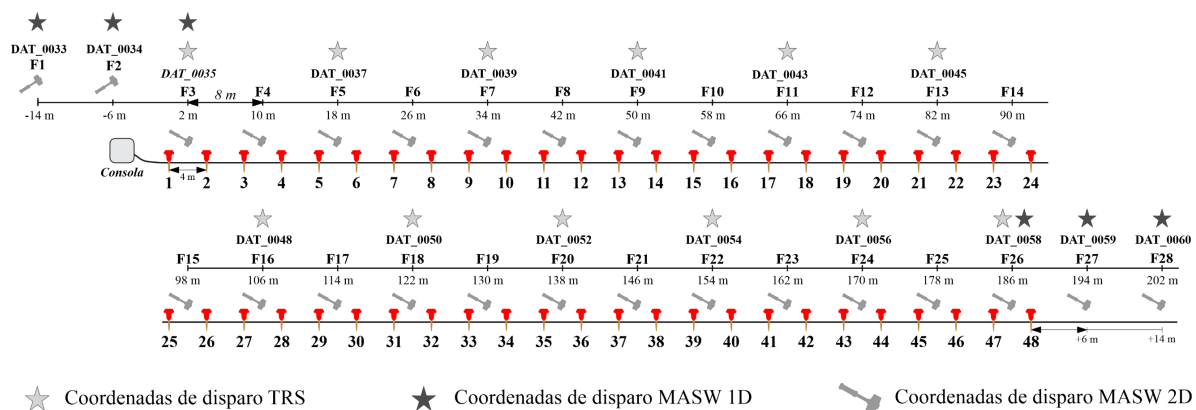
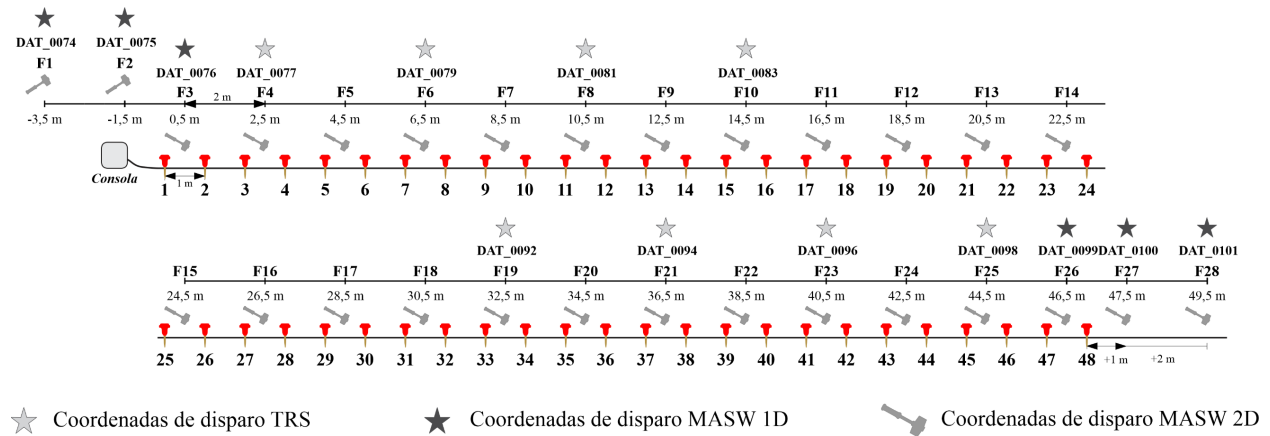


Figura 19

Diseño de adquisición de la línea 3 para la Tomografía de Refracción Sísmica, MASW1D y MASW2D.



6.2 Etapa de campo: Adquisición de datos

Se realizaron dos (2) perfiles geoelectricos (correspondientes las TRE) y tres perfiles sísmicos (correspondientes a la TRS y MASW). Los perfiles fueron distribuidos en el área de estudio de manera uniforme para lograr obtener la mayor información posible del subsuelo, la longitud del perfil geoelectrico TRE 01 fue de 315 m y de 189 m para la TRE 02; para los perfiles sísmicos las longitudes fueron de 188 m para la SIS 01 y SIS 02 y de 47 m para la SIS 03 (Tabla 5).

Tabla 5

Coordenadas punto inicial, central y final de líneas sísmicas y tomografías de resistividad eléctrica

Coordenadas	Inicio		Centro		Final		Longitud (m)	
	X	Y	X	Y	X	Y		
Líneas Sísmicas	SIS 01	1109729	1246752	1109787	1246681	1109848	1246607	188
	SIS 02	1109754	1246696	1109686	1246633	1109616	1246568	188
	SIS 03	1109726	1246696	1109740	1246678	1109754	1246659	47

TRE	TRE 01	1109615	1246761	1109708	1246635	1109814	1246525	315
	TRE 02	1109765	1246709	1109700	1246641	1109637	1246571	189

6.2.1 Adquisición de datos geoelectricos

La adquisición de datos geoelectricos se realizó con el resistivímetro ZZ Universal 96, y requirió los siguientes accesorios:

- Consola de mando ZZ Universal 96.
- 2 cables multielectrónico LUND con espaciamiento máximo de 5 metros, para una longitud total de 315 metros cada cable.
- 65 electrodos de acero inoxidable.
- 2 porras.
- 4 flexómetros de 50 metros.
- Batería externa de 12V.

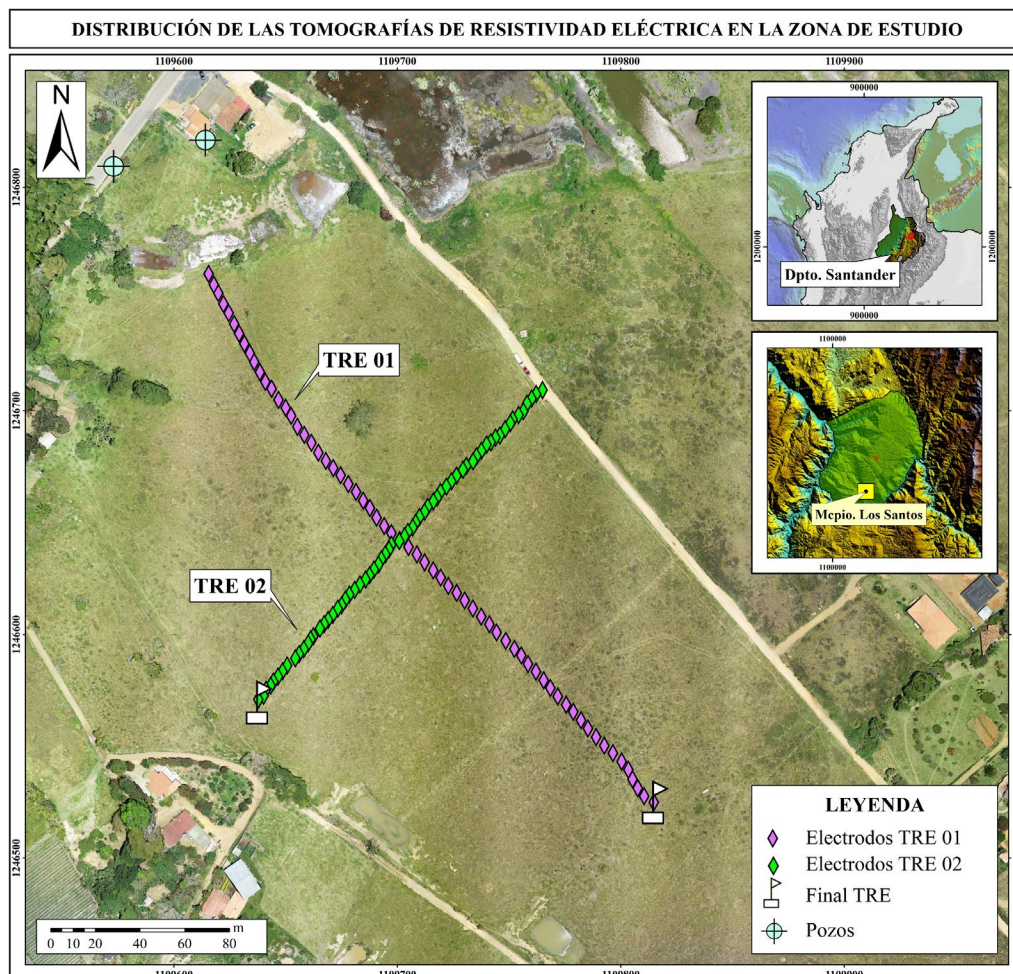
Las dos Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) fueron realizadas teniendo en cuenta que se cortaran perpendicularmente entre ellas (Figura 20), con el objetivo de inferir la posible continuidad lateral del nivel freático de ser evidenciado. El montaje de las TRE comenzó con la identificación de las direcciones de rumbo para los dos perfiles (Figura 21A), 320° (TRE 01) y 230° (TRE 02). Con la orientación de la línea establecida se procedió a la medición de la distancia entre electrodos respectiva, en el caso de la TRE 01 se midió una distancia entre electrodos de 5 metros haciendo de dos cables con un total de 64 electrodos, para una longitud total de 315 metros (Figura 21B). Para la TRE 02 la distancia entre electrodos fue de 3 metros, también se usaron 64 electrodos (2 cables), obteniendo una longitud total de la línea fue de 189 metros. Las coordenadas de los electrodos de los dos perfiles geoelectricos fueron registrados haciendo uso de un sistema

de posicionamiento global GPS, el sistema de coordenadas utilizado fue MAGNA Colombia Bogotá.

Finalizado la localización de los electrodos y su respectiva conexión a los cables, se encendió la consola de mando ZZ Universal 96 y se procedió con la prueba de electrodos para verificar el correcto funcionamiento de todos ellos (Figura 21C). Luego se configuró el arreglo a usar, se seleccionó el arreglo Schlumberger por su resolución vertical y horizontal, finalmente, se procedió con la adquisición de los datos.

Figura 20

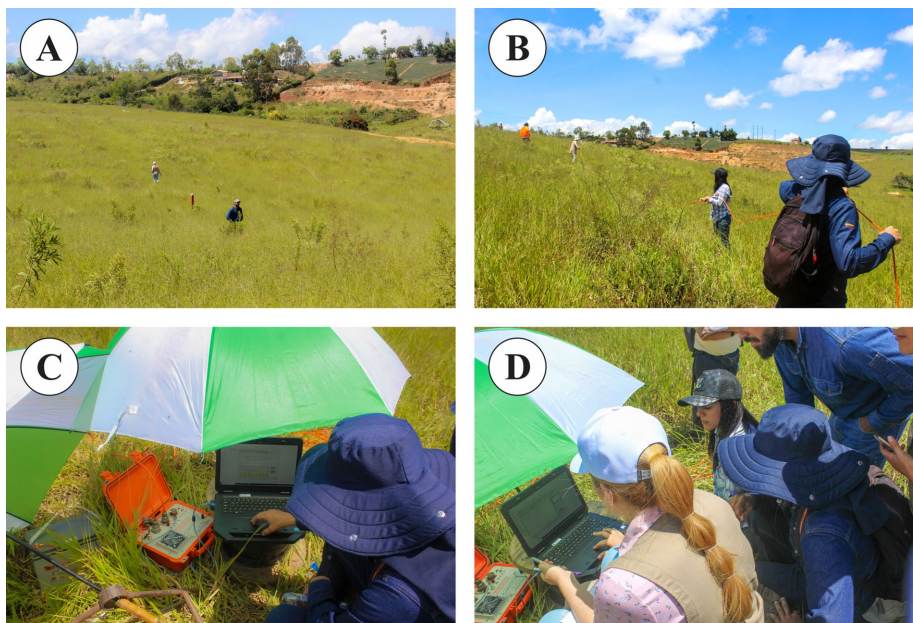
Distribución de las Tomografías De Resistividad Eléctrica en la zona de estudio



Durante el proceso de medición realizada por el equipo ZZ, se supervisó continuamente los registros visualizados en la pantalla del computador de campo para verificar el buen funcionamiento del equipo y la calidad de los datos (Figura 21D).

Figura 21

Adquisición de datos geoelectricos



Nota. En la figura se puede ver: A) Definición de la orientación de las tomografías de resistividad eléctrica. B) Despliegue de cables. C) Prueba de electrodos. D) Supervisión de las mediciones.

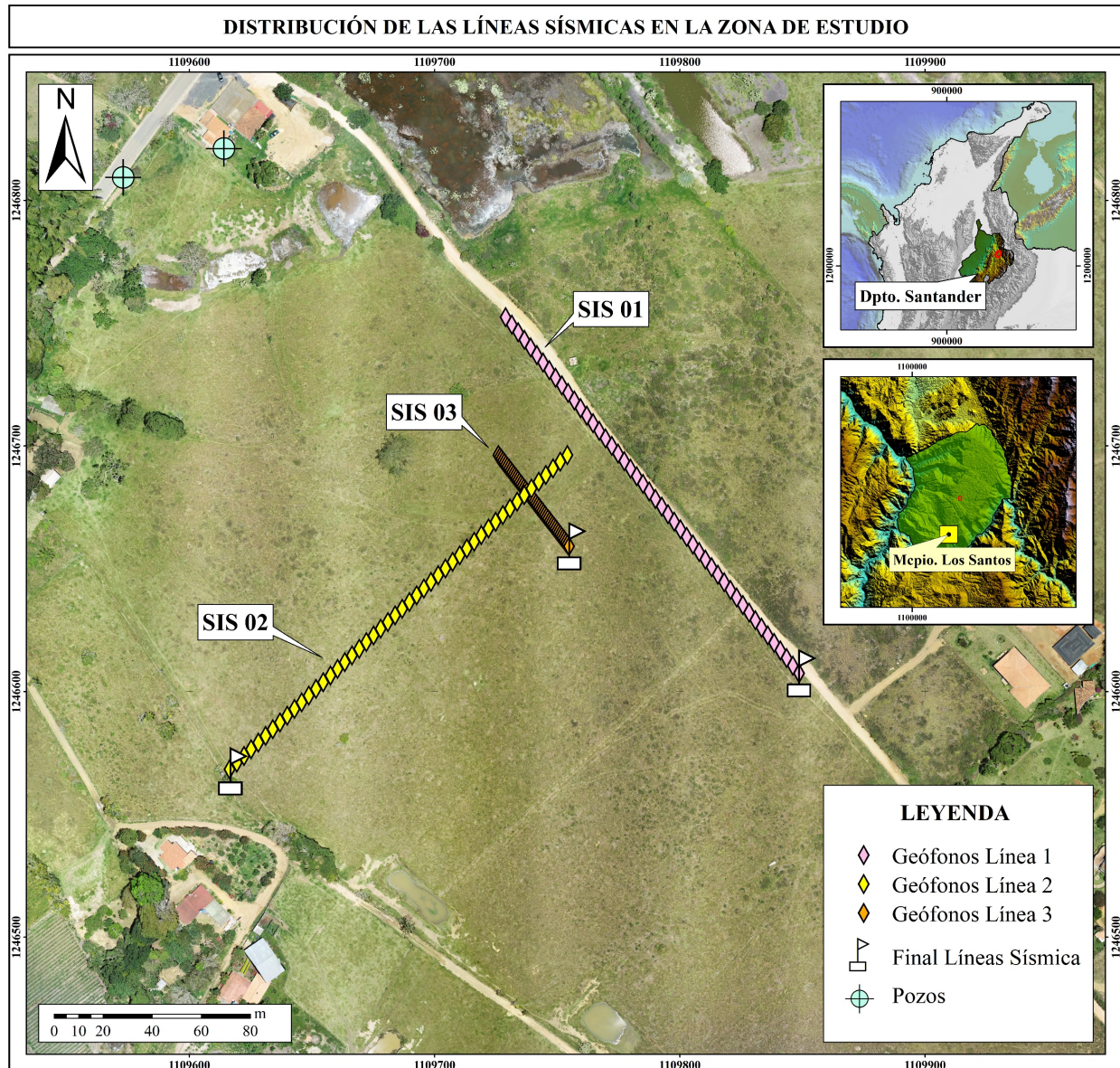
6.2.2 Adquisición de datos sísmicos

La adquisición de datos sísmicos se realizó con el equipo TERRALOC PRO (Figura 21B), y se requirió de los siguientes accesorios:

- Consola TERRALOC PRO.

- 48 geófonos verticales de 4,5 Hz.
- 4 cables sísmicos espaciado estándar de 10 m.
- Alargador Trigger.
- Radio.
- Geófono starter o starter piezoeléctrico.
- Maza de impacto de 18 libras.
- Plato de impacto.

Considerando la localización de las TRE se localizaron los tres perfiles sísmicos, el perfil SIS 01 fue realizado en el nivel topográfico alto con un rumbo de 320° (similar a la TRE 01), perpendicular a este perfil (pero sin cortarlo) se realizó el perfil SIS 02, el cual concuerda con la localización de la TRE 02 con rumbo de 230° . Paralelo al perfil SIS 01 y cortando parte de la SIS 02 se realizó el perfil SIS 03 (Figura 22). El procedimiento para la adquisición de los datos se inició con el posicionamiento de cada uno de los 48 geófonos (Figura 23A) con un espaciado de 4 metros para una longitud total de 188 metros de los perfiles SIS 01 y SIS 02; el espaciado del perfil SIS 03 fue de 1 metro para una longitud total de 47 metros. Localizados los 48 geófonos con frecuencia natural de 4.5Hz se procedió a tender los cables, conexión con los geófonos y conexión con el equipo de adquisición de datos (Figura 23B). Las coordenadas de los geófonos de los tres perfiles sísmicos fueron registradas haciendo uso de un sistema de posicionamiento global GPS, el sistema de coordenadas utilizado fue MAGNA Colombia Bogotá.

Figura 22*Distribución de las líneas sísmicas en la zona de estudio*

Para proceder con el registro de los tiempos de arribo se establecieron los parámetros de adquisición (Tabla 6). Hay dos aspectos importantes que se deben considerar: la posible saturación de la señal y la reducción del ruido incoherente a través del apilamiento vertical, que implica la suma de varias señales provenientes de disparos múltiples (Dal Moro, 2015). A continuación, se procedió a realizar al registro de la señal sísmica en los 28 puntos de disparo establecidos para

cada uno de los tres perfiles sísmicos. La fuente utilizada fue una porra de 18 libras la cual hizo impactar en una placa metálica con un stack de 10 golpes e intervalos de cada 8 metros para la SIS 01 y SIS 02, y cada 2 metros para la SIS 03 (Figura 23C).

Figura 23

Adquisición de datos Sísmicos



Nota. A) Instalación de geófonos. B) Conexión de cables al equipo. C) Generación de fuentes sísmicas golpeando una placa metálica con una maza de 18 libras.

Tabla 6

Parámetros usados para la prospección sísmica

Fuente	Porra de 18 libras	
Tipo de geófonos	Geófonos Verticales	
Frecuencia natural de los geófonos	4,5 Hz	
Cantidad de canales	48	
Longitud total	SIS01	188m
	SIS02	188m

	SIS03	47m
Separación de geófonos	SIS01	4m
	SIS02	4m
	SIS03	1m
Distancia entre la fuente y el primer geófono (Offset Mínimo)	SIS01	12m
	SIS02	12m
	SIS03	3m
Tiempo de registro	2000 ms	
Intervalo de muestreo (dt)	1 ms	

6.3 Fase de oficina: Clasificación del suelo y modelado/Inversión/Interpretación

Los datos obtenidos en campo se consideran como datos crudos, los cuales se les debe aplicar un flujo de procesamiento haciendo uso de métodos de inversión matemáticos para obtener modelos del subsuelo, los cuales son analizados e interpretados para la generación de modelos esquemáticos finales.

6.3.1 Flujo de procesamiento Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

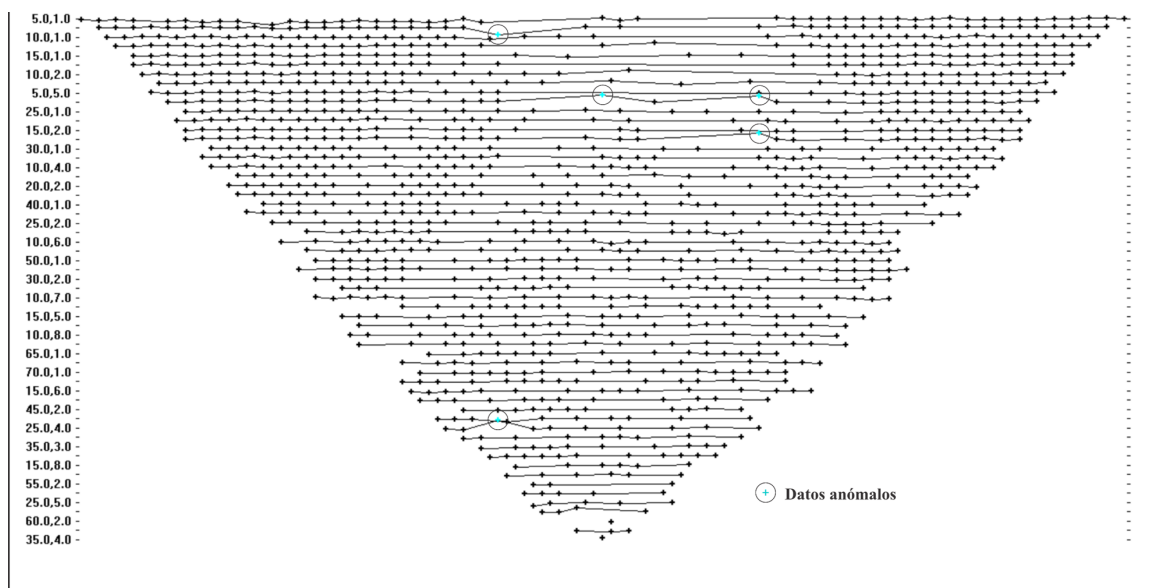
Los datos que se adquirieron en campo corresponden a resistividades aparentes, el objetivo del procesamiento de estos datos es obtener las resistividades reales y posteriormente correlacionar con la información geológica del área de estudio. A continuación, se detalla sobre el procesamiento de la TRE 01, el cual también se replicó para la TRE 02, es importante mencionar que en el archivo

.dat generado de la extracción de los datos del computador de campo se incluyó la topografía de la zona.

El flujo de procesamiento inició con un análisis del comportamiento de los valores de resistividad en los diferentes niveles de la pseudosección, donde se eliminaron los datos de resistividad erróneos o “anómalos” esto con el fin de obtener un resultado más óptimo en el modelo final (Figura 24). Luego se procedió a establecer la configuración del modelo discretizado y los parámetros de inversión que se consideraron óptimos para el modelo caso de estudio (Tabla 7).

Figura 24

Análisis de datos anómalos "Bad Data Points"



Nota. Los puntos seleccionados se eliminaron del procesamiento de los datos. Ejemplo para la TRE 01 con el arreglo Schlumberger.

Tabla 7

Parámetros usados para el procesamiento de las tomografías de resistividad eléctrica (TRE).

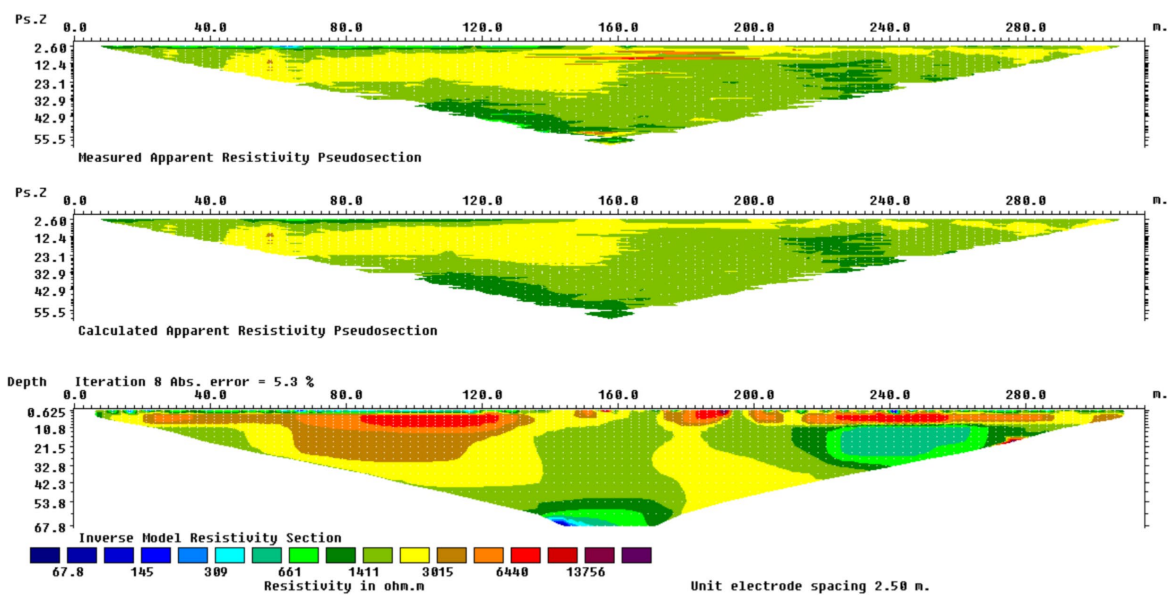
Parámetros	Especificaciones
Arreglo	Schlumberger
Separación de los electrodos	TRE 01: 5 metros
	TRE 02: 3 metros
Número total de electrodos	64
Iteraciones	8
Numero de nodos entre electrodos adyacentes	4
Tipo de método de modelado directo	Método de diferencias finitas
Tipo de malla	Malla más fina
Límite de convergencia para cambio relativo de error	1
Modelo extendido	No
Modelo refinado	Si

Se realizó una primera inversión con el fin de revisar el comportamiento de las resistividades aparentes que se obtuvieron en la adquisición y de ser requerido hacer ajustes al modelo discretizado y parámetros de inversión, se utilizaron un total de 8 iteraciones con el interés de obtener un rango más amplio para ajuste del modelo y disminuir el porcentaje de error, el programa por defecto genera un total de 4 iteraciones. Los resultados son una pseudosección aparente (Figura 25) y una pseudosección teórica obtenida del modelo invertido generado (Figura 25), las pseudosección son comparadas en el cálculo del error. El modelo de inversión con valores

de resistividades reales (Figura 25) es evaluado de acuerdo con el criterio geológico, al obtener estos resultados se evalúa también el comportamiento del Root Mean Square Error (RMSE) de los datos, este error puede ser reducido mediante el filtrado de los valores que posean un error alto entre los valores medidos y calculados, haciendo uso del crossplot de los datos (Figura 26).

Figura 25

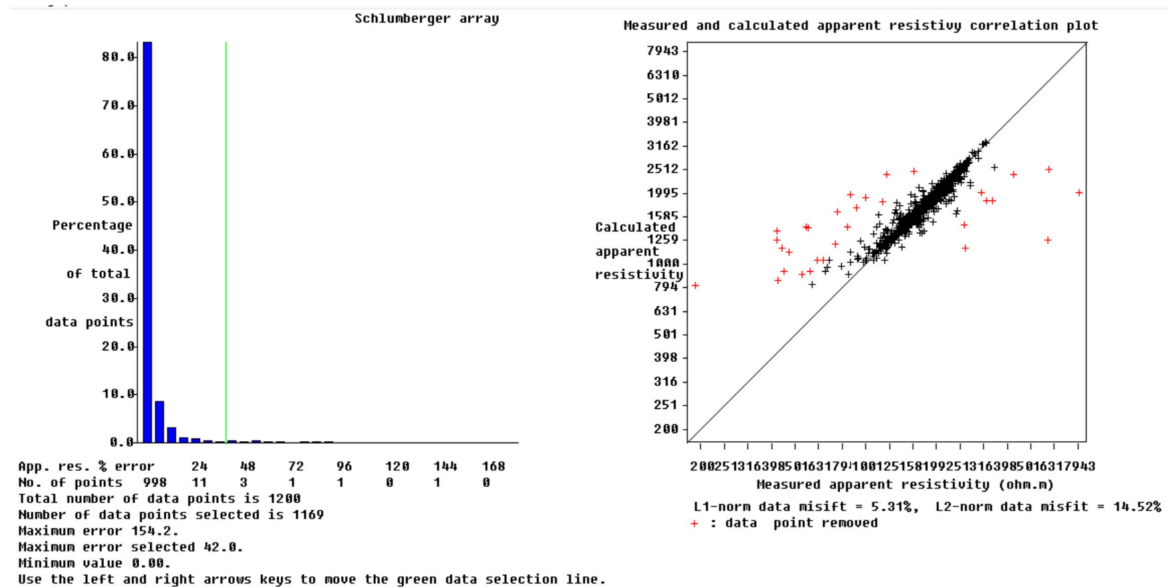
TRE inversión preliminar



Nota. Primera inversión de los datos de la TRE con arreglo Schlumberger para observar el comportamiento del modelo resuelto considerando los datos adquiridos, la inversión corresponde a la TRE 01.

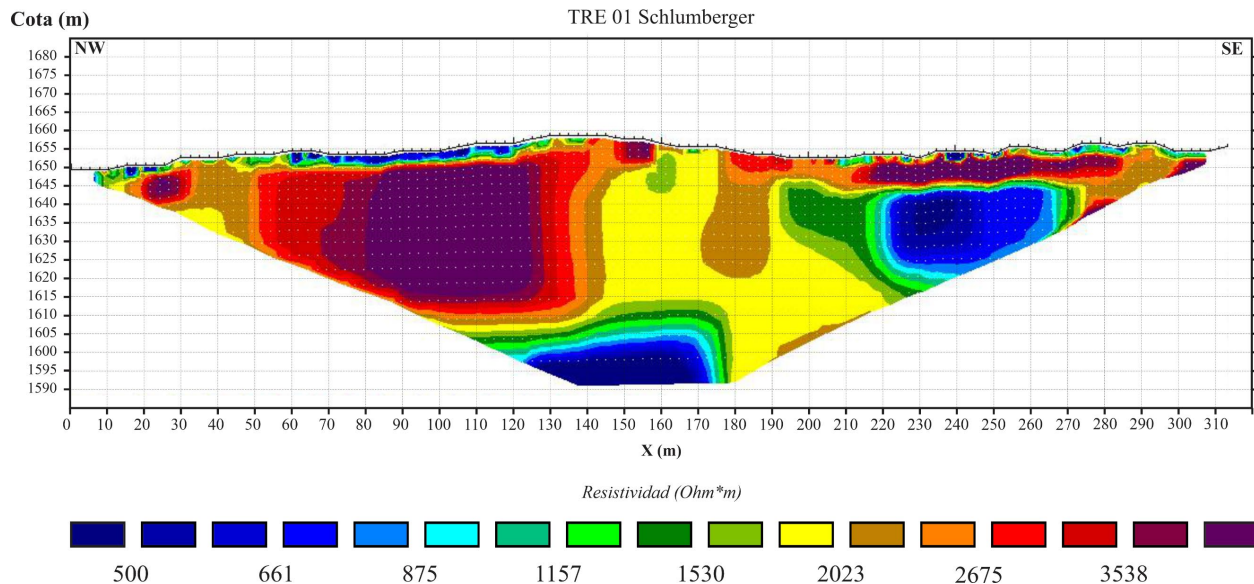
Figura 26

Valores del Error Root Mean Square (RMSE) para el modelo generado.



Nota. Análisis y filtrado de los resultados obtenidos considerando el error RMS entre los valores medidos en campo y los calculados en el proceso de inversión con arreglo Schlumberger para la TRE 01.

De haber sido requerido el filtrado (eliminación) de datos con un error alto, se procede nuevamente a realizar la inversión de los datos reducidos, para obtener una última inversión y obtener el modelo final, el cual va a incluir la topografía (Figura 27).

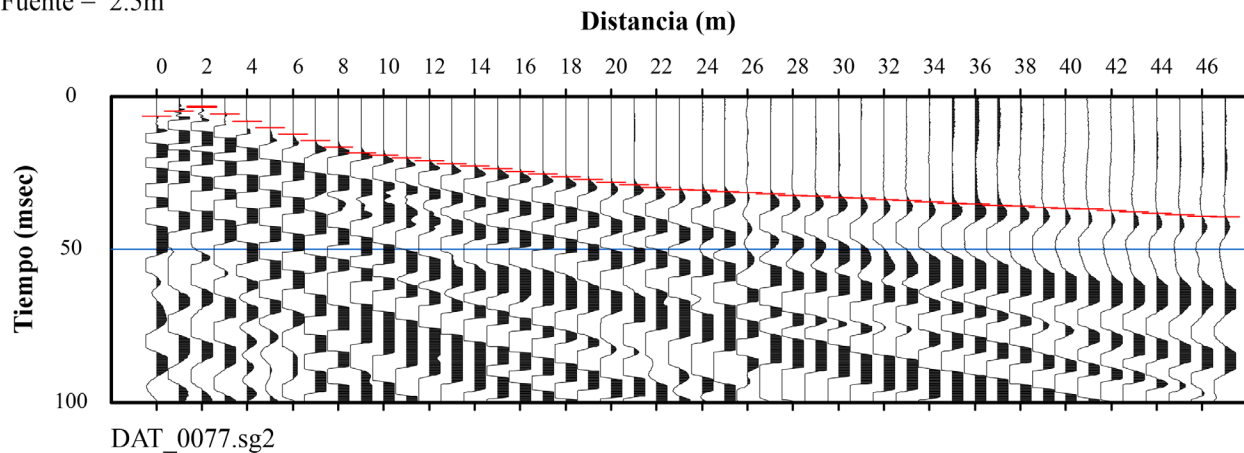
Figura 27*Modelo final de la TRE01 con arreglo Schlumberger*

6.3.2 Flujo de procesamiento Tomografía de Refracción Sísmica (TRS)

A continuación, se ejemplifica el flujo de procesamiento para el perfil SIS 03, el cual fue replicado para los perfiles SIS 01 y SIS 02. Como primer paso en el flujo de procesamiento de los datos sísmicos, se revisó el registro de las ondas sísmicas (archivos individuales generados para cada fuente) para verificar que fueran correctas las coordenadas de disparo, distancia entre geófonos y demás parámetros geométricos y tiempos de registro (asociado a las cabeceras de los archivos). Finalizada la verificación de las cabeceras, se procedió al picado de los primeros arribos, para lo cual se procedió a hacer la corrección al tiempo de disparo y aplicación de filtros que permitieran ver con claridad el registro del primer arribo o llegada de la onda Tipo P (Figura 28).

Figura 28*Picado de los primeros arribos de las ondas refractadas críticamente*

Fuente = 2.5m

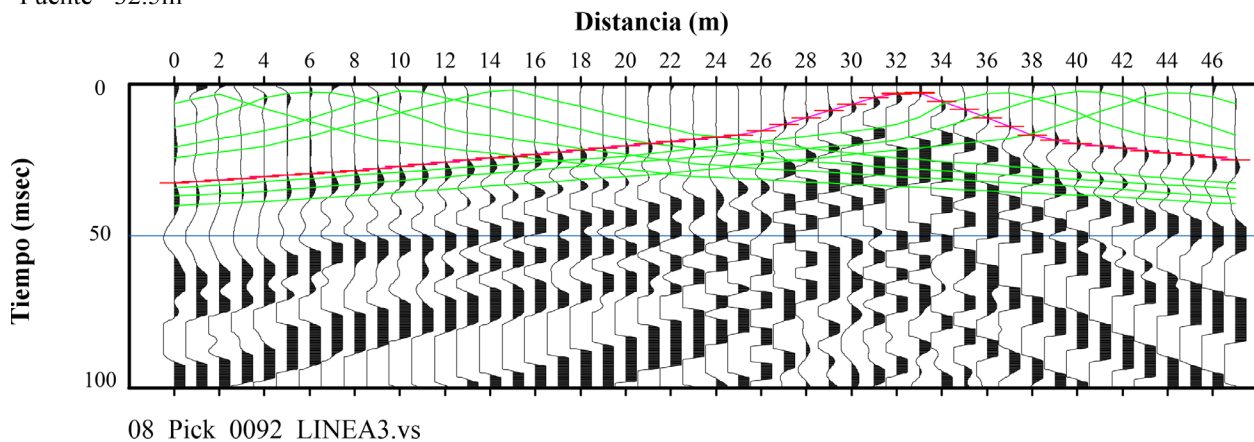


Nota. Los segmentos de la línea en color rojo representan las primeras llegadas de las ondas refractadas para el perfil sísmico SIS 03.

Este proceso de picado de los primeros arribos fue realizado para cada uno de los registros en las diferentes posiciones de disparo, se obtuvo en el último dato procesado una gráfica que contiene todos los picados que se han realizado en la línea (Figura 29).

Figura 29*Primeros arribos de las ondas refractadas críticamente*

Fuente= 32.5m



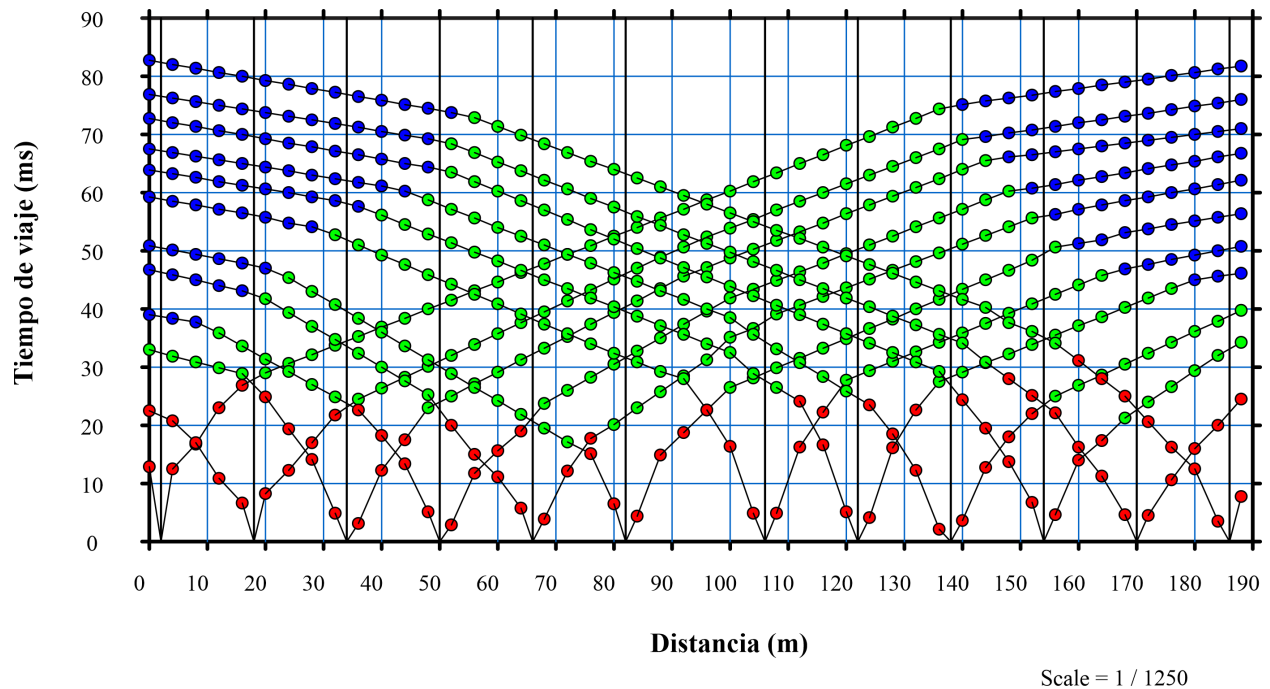
Nota. Los segmentos de la línea en color rojo y las líneas verdes representan las primeras llegadas de las ondas refractadas para el perfil sísmico SIS 03.

Con la información de los primeros arribos se generan las curvas de tiempo de viaje o dromocronas (distancia versus tiempo), las cuales se analizaron para asignar capas de acuerdo con los cambios de pendiente, en el caso de este proyecto se seleccionaron 3 capas (Figura 30), de los 28 puntos de disparos establecidos anteriormente para los perfiles sísmicos, se seleccionaron 12 de ellos para realizar el procesamiento debido a que algunos datos adquiridos tenían una alta señal de ruido y se requería que estos datos fueran equidistantes.

Establecidos los cambios de pendiente asociados a los refractores en el subsuelo se procedió a generar un modelo simple o modelo inicial (Figura 31). Este modelo fue considerado para la inversión por mínimos cuadrados para obtener un modelo final por el método de Tomografía de Refracción Sísmica de las velocidades de onda P (Figura 32).

Figura 30

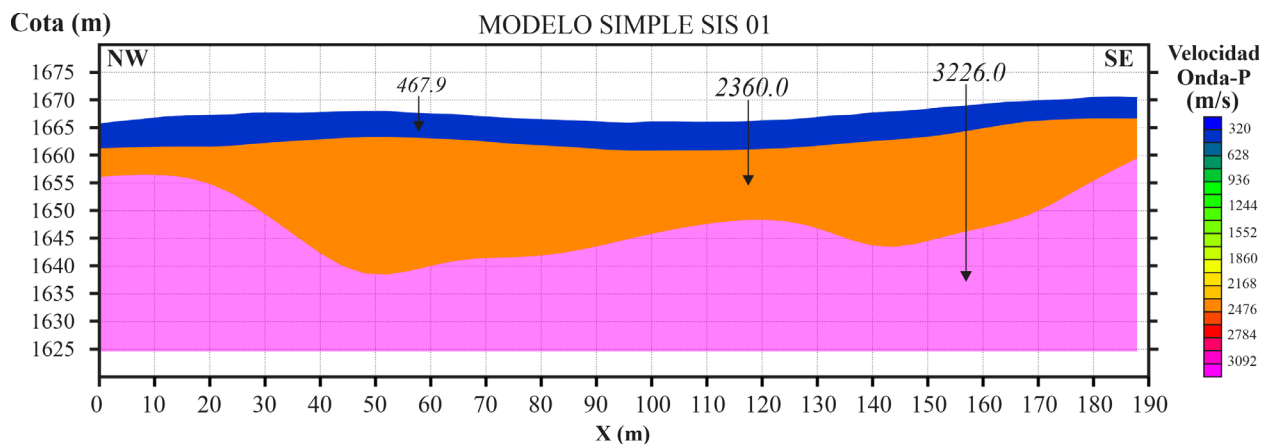
Primeros arribos de las ondas refractadas críticamente



Nota. Representación para 12 coordenadas de disparo, los círculos en color rojo, verde y azul representan la asignación de capas en los diferentes cambios de pendiente observados en la SIS01.

Figura 31

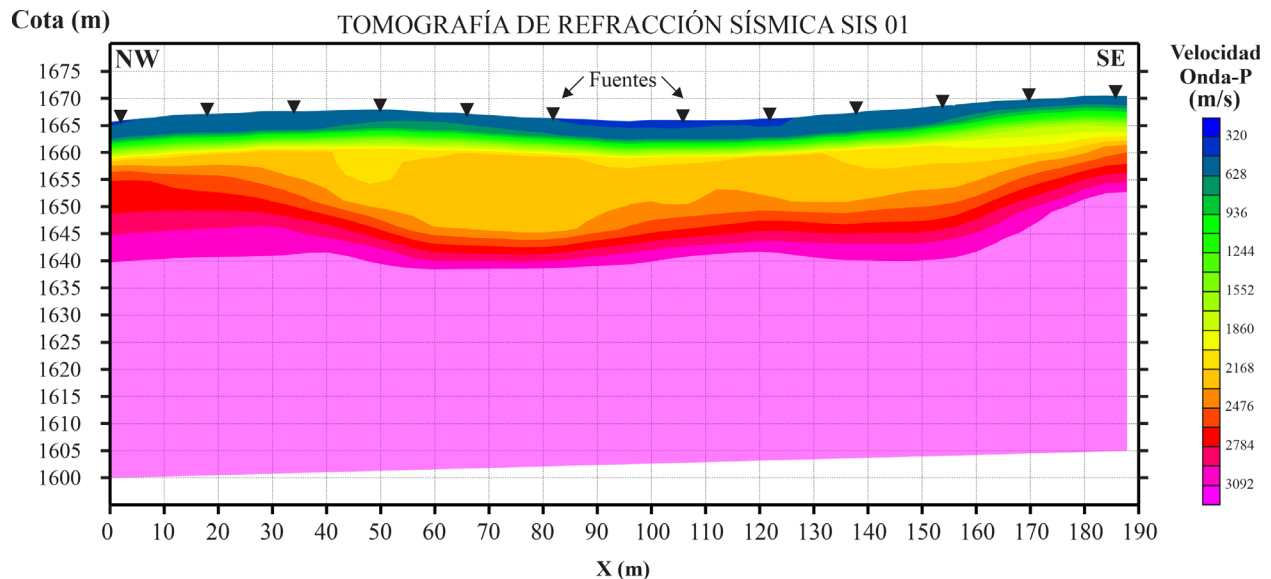
Modelo preliminar de la velocidad de onda P



Nota. Modelo simple de tres capas obtenido para la línea 1 (SIS01) considerando los cambios de pendiente picados previamente.

Figura 32

Tomografía Sísmica de refracción mediante una inversión por mínimos cuadrados



Nota. Modelo final obtenido aplicando el método de Tomografía de Refracción Sísmica por el perfil sísmico SIS01.

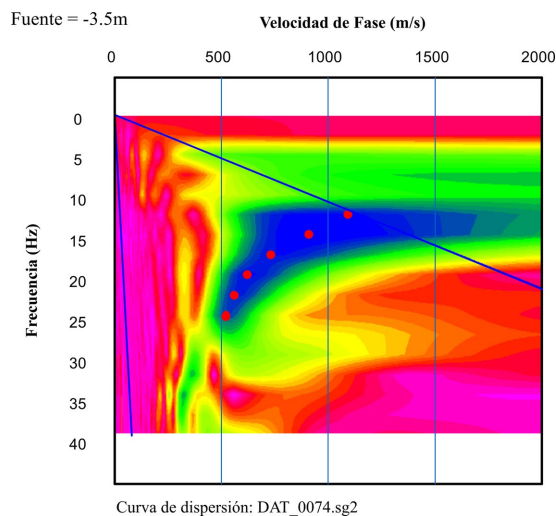
6.3.3 Flujo de procesamiento MASW1D

El primer paso para el procesamiento de MASW1D no difiere con el procesamiento de la Tomografía de Refracción Sísmica, primero se revisó que cada uno de los golpes y la localización de los geófonos. Posteriormente se procedió a realizar un cálculo de autocorrelación espacial de los registros sísmico y se generó una gráfica en el dominio de velocidad de fase versus frecuencia,

para obtener la curva de dispersión mediante la Transformada de Fourier (Figura 33), este paso se repitió para cada uno de los puntos de disparos analizados.

Figura 33

Dato transformado en el dominio de velocidad de fase vs frecuencia aplicando la transformada de Fourier rápido (FFT).



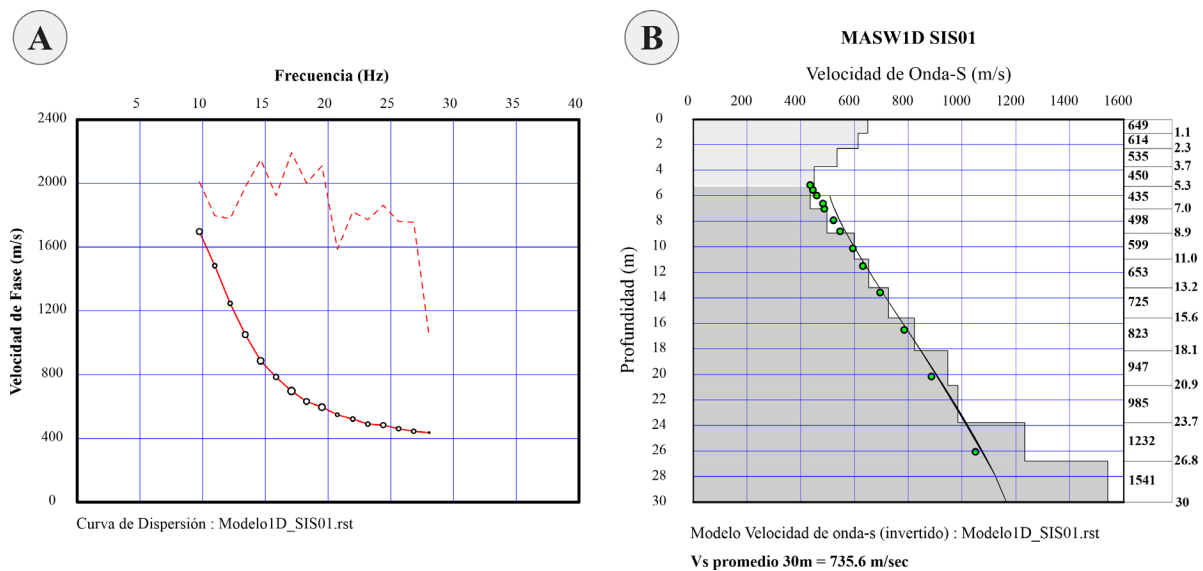
Nota. Puntos de dispersión obtenidos para un dato de la línea 3 (SIS03).

Obtenidos los puntos de dispersión se procedió a verificar la calidad de la señal ruido y certidumbre de los datos para posterior realizar la inversión (Figura 34A), esta curva de dispersión va a corresponder al modo fundamental de las ondas superficiales. Para que el perfil del subsuelo obtenido de la fase teórica se adapte mejor al perfil de la fase observada se realizó un total de 5 iteraciones para la inversión por mínimo cuadrados, este paso se realizó para reducir el error RMS donde el error aceptado debe ser menor al 10%. El modelo obtenido del subsuelo 1D busca replicar

la curva de dispersión obtenida (Figura 34B) lo que se busca en este paso es obtener un modelo inicial basado en las curvas de dispersión observadas.

Figura 34

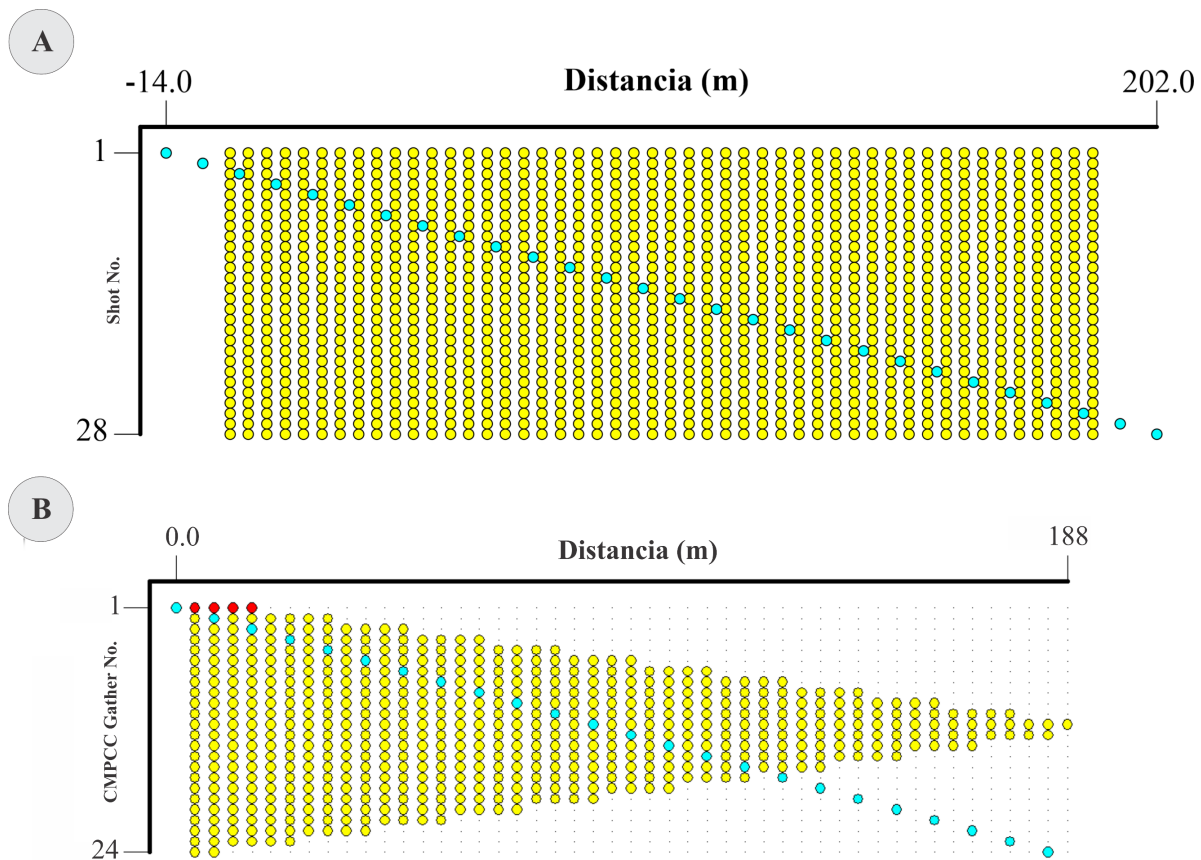
Curva de dispersión para el modo fundamental y modelo del subsuelo en un perfil 1D de la velocidad de onda de corte (V_s) versus la profundidad



Nota. A) Curva de dispersión para el modo fundamental de la línea 1 (SIS01). El modelo del subsuelo en un perfil 1D (B) se obtiene para cada uno de los puntos de golpe donde existe redundancia de información, siendo el centro de la línea el que más información obtiene, modelo del subsuelo en perfil 1D para la línea 1 (SIS01).

6.3.4 Flujo de procesamiento MASW2D

El procesamiento de MASW2D se inicia creando una lista de todos los datos que se tenían para cada una de las líneas, esto con el fin de organizarlas por CMP (Common Middle Point) es decir el punto medio común (Figura 35A).

Figura 35*Procesamiento MASW2D Punto Medio Común*

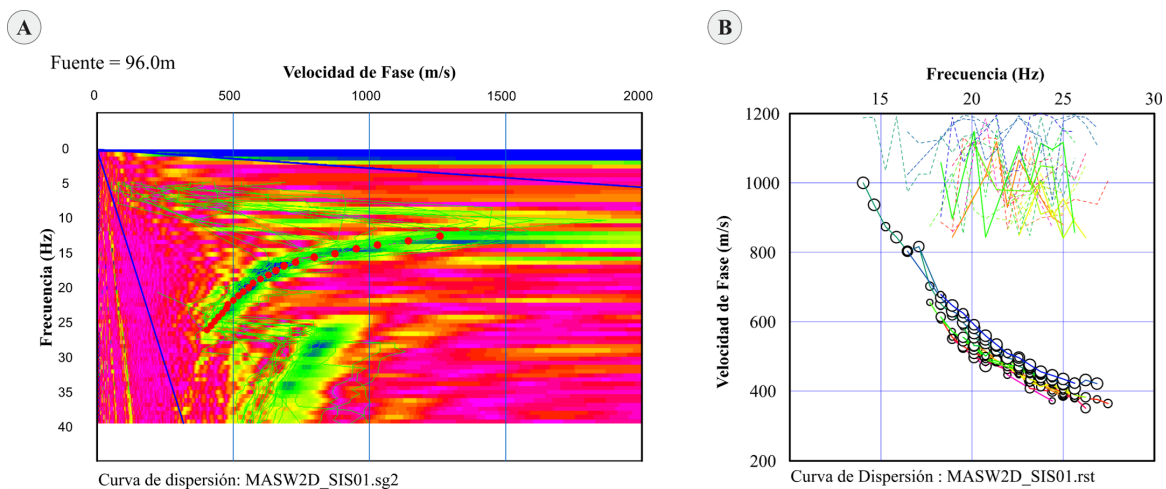
Nota. A) Ejemplo correspondiente a la SIS01, los círculos de color azul turquesa representan los puntos de disparo, los círculos de color amarillo representan el receptor para el que se ha leído la traza, los círculos de color blanco representan un punto de la cuadrícula. B) Grafico de la geometría de recopilación de correlación cruzada de los CMP analizados, los círculos de color rojo indican al receptor para el que se seleccionaron las trazas.

Obtenidos los CMP de cada uno de los puntos de disparo se realizó la Transformada de Fourier a los datos, pasando al dominio de la frecuencia y poder obtener las curvas de dispersión iniciales editadas manualmente (Figura 36A), estas curvas fueron corregidas eliminando los datos

de alta y baja frecuencia (Figura 36B). Ajustadas las curvas se generó un modelo inicial el cual se buscó ajustar de manera iterativa durante la inversión, este modelo inicial considera las Velocidades de Fase y rango de Frecuencias para establecer los *intervalos* de confianza en profundidad. Finalmente, se generó un modelo invertido 2D a partir de 5 iteraciones, con los rangos de velocidades presentes a lo largo de la línea para la onda Vs (Figura 37).

Figura 36

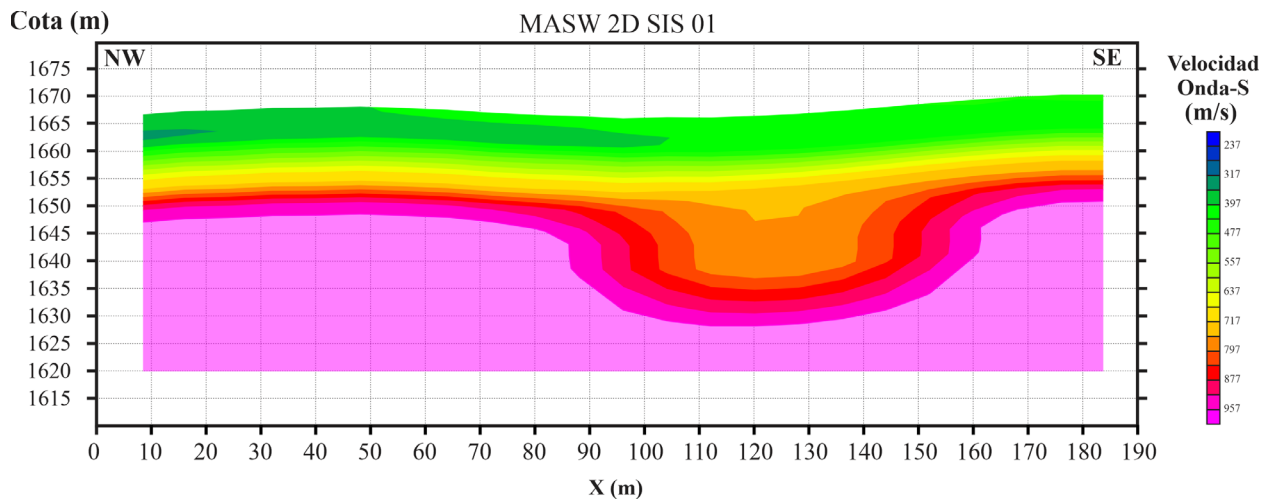
Procesamiento MASW2D



Nota. En la figura: A) Dato transformado en el dominio de velocidad de fase vs frecuencia aplicando posteriormente a la transformada de Fourier rápida, dato correspondiente a la línea 1 (SIS01). B) Curva de dispersión para el modo fundamental de la línea 1 (SIS01).

Figura 37

Modelo final del subsuelo 2D de la velocidad de onda de corte (V_s)



Nota. Modelo final obtenido aplicando el método de MASW2D para la línea 1 (SIS01).

6.3.5 Clasificación del perfil del suelo

Posterior a la generación de los modelos producto de la inversión geofísica, se procedió a identificar valores de resistividad que se puedan asociar con presencia o ausencia de agua en las TRE, este contraste de resistividad se correlacionó con la relación V_p/V_s de los modelos de TRS y MASW al considerarse que las ondas tipo S no se propagan en el agua (sufrirían un decaimiento en la velocidad en medios saturados, V_p/V_s alto). Para realizar la clasificación del perfil del suelo se empleó como referencia la Normativa Internacional ASTM D5777 (Tabla 2) y el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Tabla 3), para esta última se requiere el cálculo de los módulos elásticos del subsuelo a partir de los valores de velocidad de onda tipo P y tipo S obtenidos de los ensayos de TRS y MASW respectivamente. Obtenida una clasificación preliminar se procedió al análisis e interpretación conjunta de los resultados para la generación de

modelos esquemáticos para el entendimiento y representación del comportamiento del nivel freático en el área de estudio.

7. Resultados

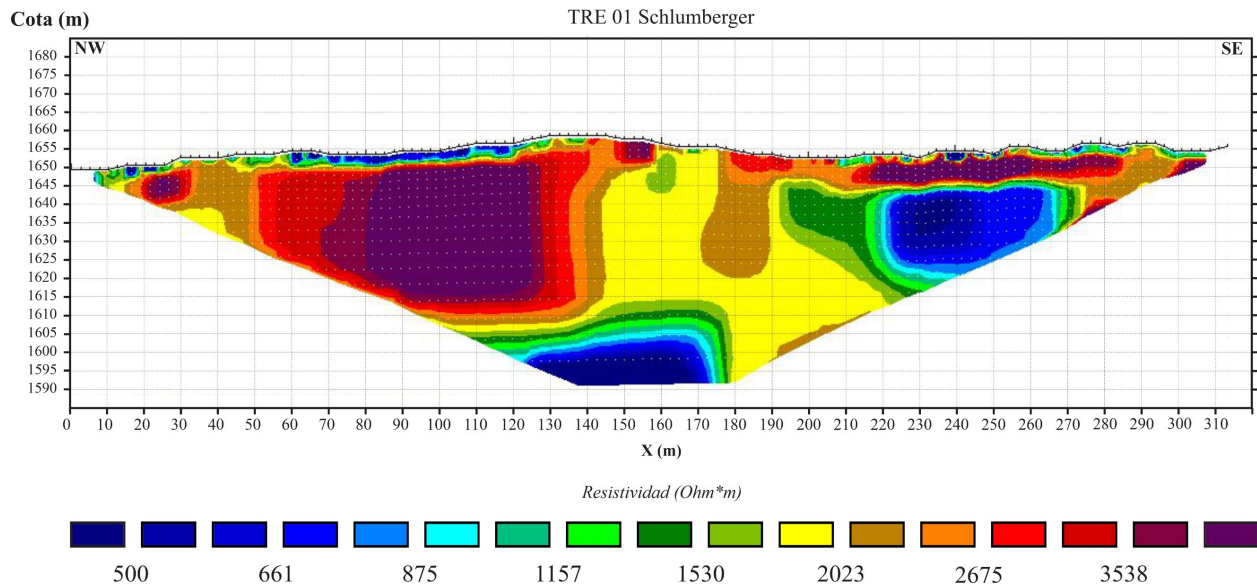
7.1 Contrastes de las propiedades físicas del subsuelo a partir de TRE, TRS y MASW

7.1.1 Resultados Tomografía de Resistividad Eléctrica

Durante la prueba de electrodos o comprobación de la buena conexión entre los electrodos y los cables multielectrónicos para la TRE 01 y TRE 02 se identificó que los electrodos 28, 30, 37, 38 y 40 registraron valores anómalos de resistividad, por lo que fueron retirados (desactivados) en el software de adquisición estos cinco electrodos y evitar que afectaran la calidad de los datos registrados. En consideración que ambos perfiles geoelectrónicos, TRE 01 y TRE 02, se realizaron cortándose entre ellas en la misma área de estudio, los modelos de modelo de inversión obtenidos son representados en una misma escala o rangos de resistividad para una mayor facilidad de análisis e interpretación.

7.1.1.1 Resultados TRE 01.

El modelo final de resistividad obtenido para el perfil geoelectrónico TRE 01 (Figura 38) con una longitud de 315 metros sobre la horizontal, se estima una profundidad máxima de investigación de aproximadamente 60 metros. A lo largo del modelo recuperado los primeros 5 metros de profundidad se estiman valores de resistividad heterogénea, cubriendo todo el rango de resistividad con valores de $< 500 \Omega * m$ (colores azules) a $> 3538 \Omega * m$ (colores rojos), siendo notorio que entre las abscisas 140-210 los valores de resistividad son mayores a los $2023 \Omega * m$ (colores amarillos a rojos).

Figura 38*Resultado Tomografía de Resistividad Eléctrica TRE 01*

A profundidades mayores se evidencian al menos tres contrastes representativos, el primer contraste se infiere a la izquierda de la TRE 01 entre las abscisas 0-140 y cotas entre los 1650-1610 (5 a 45 metros en profundidad aproximadamente) el modelo estima valores de resistividad $> 2675 \Omega * m$ (colores cafés a rojos), a partir de los 45 metros en profundidad (cotas menores a los 1610 metros) el modelo estima resistividades $< 1530 \Omega * m$ (colores azules a verdes) pero con una extensión lateral entre las abscisas 110-180 metros. El segundo contraste de resistividad también se puede asociar a un cambio en profundidad, localizado entre las abscisas 200-280, entre las cotas 1650-1645 (5 a 10 metros en profundidad aproximadamente) los valores de resistividad son $> 2675 \Omega * m$ (colores cafés a rojos), a partir de los 10 metros en profundidad (cota 1645) hasta los 30 metros (cota 1620) en profundidad el modelo estima resistividades $< 1530 \Omega * m$ (colores azules a verdes) manteniendo una extensión lateral semejante a un lente entre las abscisas

200-280. El tercer contraste o cambio representativo de resistividad se denota como un contraste lateral, el cual diferenciaría los dos primeros contrastes evidenciados. Este tercer contraste se asocia con la variación lateral en los valores de resistividad de la TRE 01 a profundidades entre los 5 a 45 metros (cotas 1650 a 1610), generalizando en tres secciones, a la izquierda o NW los valores altos de resistividad $> 2675 \Omega \cdot m$, colores cafés a rojos), en el centro valores de resistividad intermedio ($1530 - 2675 \Omega \cdot m$, colores en general amarillos) y a la derecha o SE valores de resistividad bajos ($< 1530 \Omega \cdot m$, colores azules a verdes).

7.1.1.2 Resultados TRE 02.

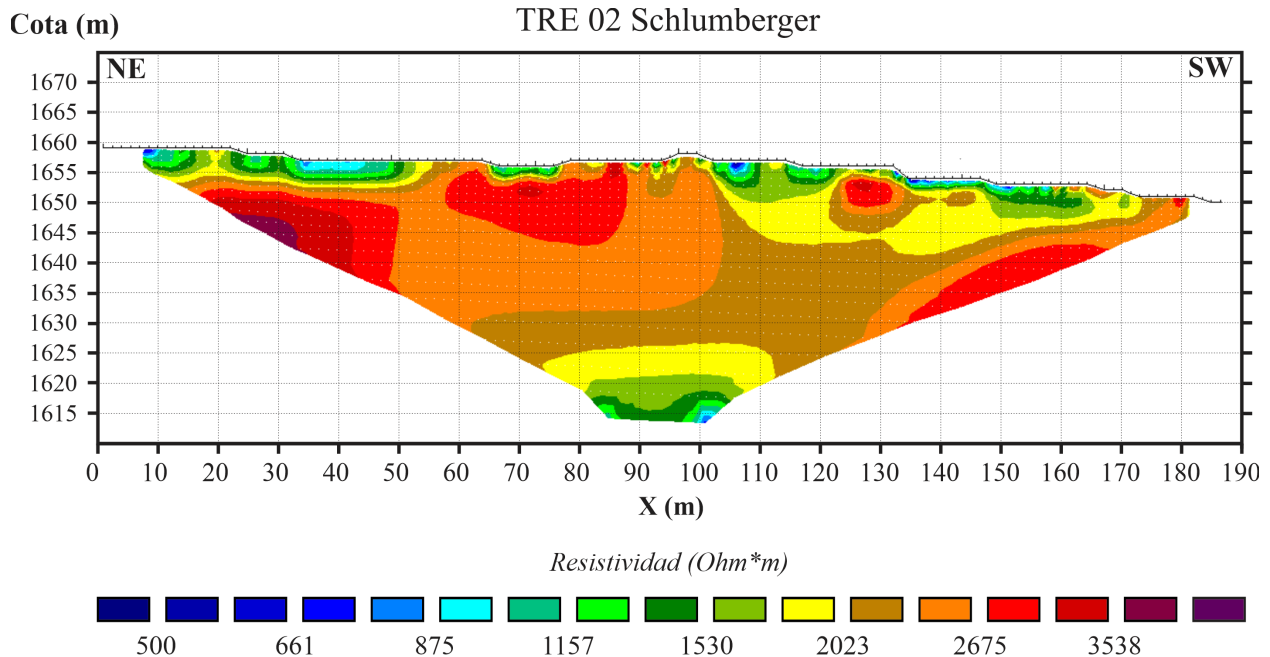
El modelo final de resistividad obtenido para el perfil geoelectrico TRE 02 (Figura 39) con una longitud de 189 metros sobre la horizontal estima una profundidad máxima de investigación de aproximadamente 45 metros. A lo largo del modelo recuperado los primeros 5 a 7 metros de profundidad se estiman en general valores de resistividad ($< 1530 \Omega \cdot m$ (colores azules a verdes), con algunas excepciones donde los valores de resistividad fueron $> 3538 \Omega \cdot m$ (colores rojos).

A profundidades mayores de los 7 metros (cotas menores a los 1655) los valores de resistividad aparentan una homogeneidad, no se identifican contrastes laterales o verticales representativos, con valores $> 2675 \Omega \cdot m$ (colores cafés a rojos) hasta profundidades aproximadas de 30 metros (cota 1625), dos anomalías de valores de resistividad alta ($> 3528 \Omega \cdot m$ colores violetas) son inferidos por el modelo entre las abscisas 60-90 y 125-135, en la izquierda o NE y derecha o SW de la TRE 02 se recuperan también valores de resistividad altos ($> 3528 \Omega \cdot m$, colores violetas). Un contraste vertical en los valores de resistividad es recuperado por el

modelo a profundidades de 35 metros (cota 1625), los valores de resistividad son $< 1530 \Omega * m$ (colores azules a verdes).

Figura 39

Resultado Tomografía de Resistividad Eléctrica TRE 02



7.1.2 Resultados Sísmica (TRS/MASW)

Similar a lo realizado con la representación gráfica de los resultados de TRE, se generalizó una misma escala de velocidades de onda tipo P y tipo S para los tres perfiles sísmicos al localizarse próximos entre ellos y ayudar en la interpretación y discusión.

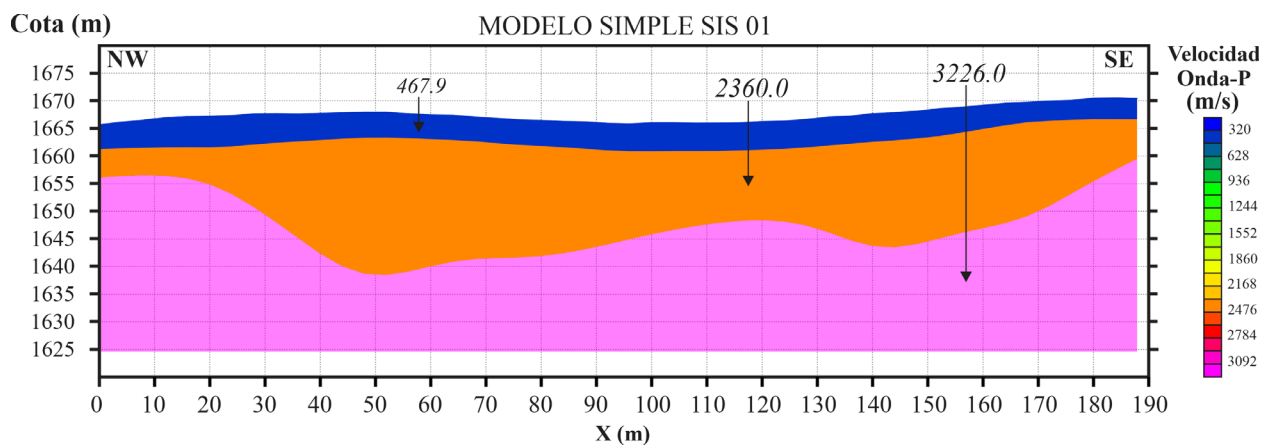
7.1.2.1 Resultado SIS 01.

En el picado de los primeros arribos correspondientes con la onda tipo P (V_p) se generaron tres rectas con diferente pendiente (correspondiente a distancias crossover) infiriendo la presencia

de tres capas. El modelo inicial o simple de tres capas, contrastes o cambios verticales en los valores de velocidad del subsuelo, obtenido (Figura 40) estima para la capa 1 una velocidad promedio de $467,9 \text{ m/s}$ con un espesor promedio de 5 metros, para la capa 2 una velocidad promedio de 2360 m/s con espesor promedio de 15 metros, el último refractor relacionado con la capa 3 se estima una velocidad de 3226 m/s . El modelo inicial infiere una profundidad de investigación total aproximada de 40 metros, la capa 1 presenta homogeneidad lateral en su espesor, por el contrario, la capa 2 aparenta un adelgazamiento a la izquierda o NW (entre las abscisas 0-50) y a la derecha o SE (entre las abscisas 150-189).

Figura 40

Modelo preliminar de la velocidad de onda P línea 1 (SIS01)



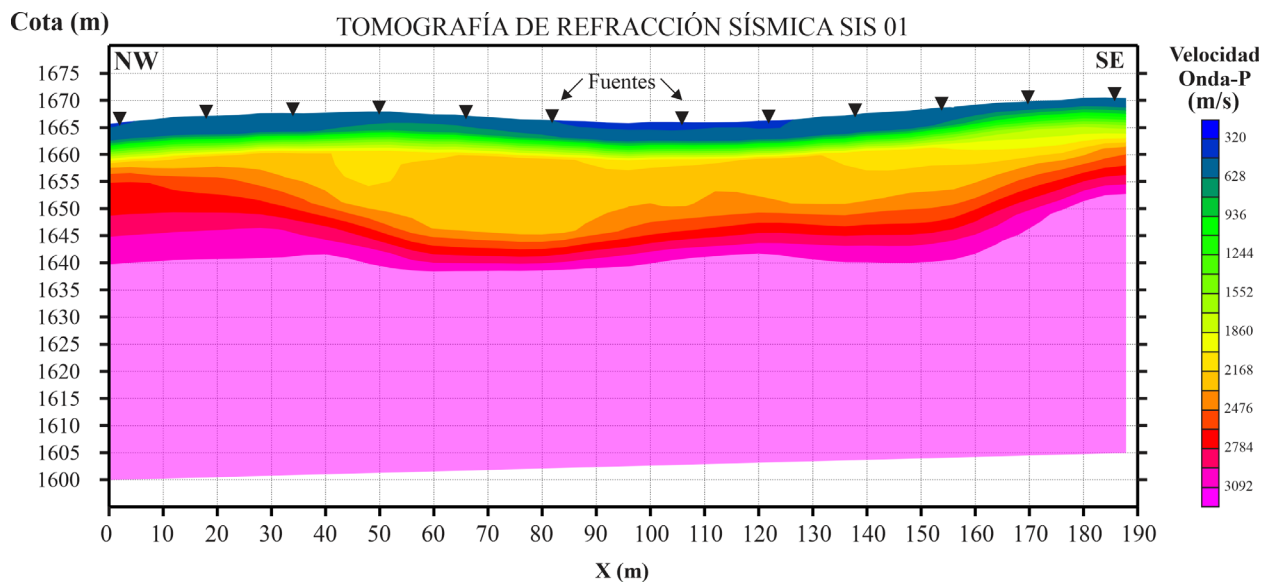
Nota. Modelo simple de tres capas obtenido para la línea 1 (SIS01) considerando los cambios de pendiente picados previamente.

El modelo obtenido por el método de inversión de Tomografía de Refracción Sísmica consideró el modelo inicial de refracción, el modelo de TRS conserva el aumento de velocidad en profundidad, pero con una aparente homogeneidad para la capa 2 (Figura 41). La capa 1 se estiman unas velocidades entre $340 \text{ m/s} - 936 \text{ m/s}$, para la capa 2 velocidades entre $936 - 2784 \text{ m/s}$,

y la última capa se estiman una velocidad mayor a 2784 m/s , la profundidad promedio del último refractor o capa 3 en la TRS es de aproximadamente 25 metros (cota 1640).

Figura 41

Tomografía Sísmica de refracción mediante una inversión por mínimos cuadrados línea 1 (SIS01)

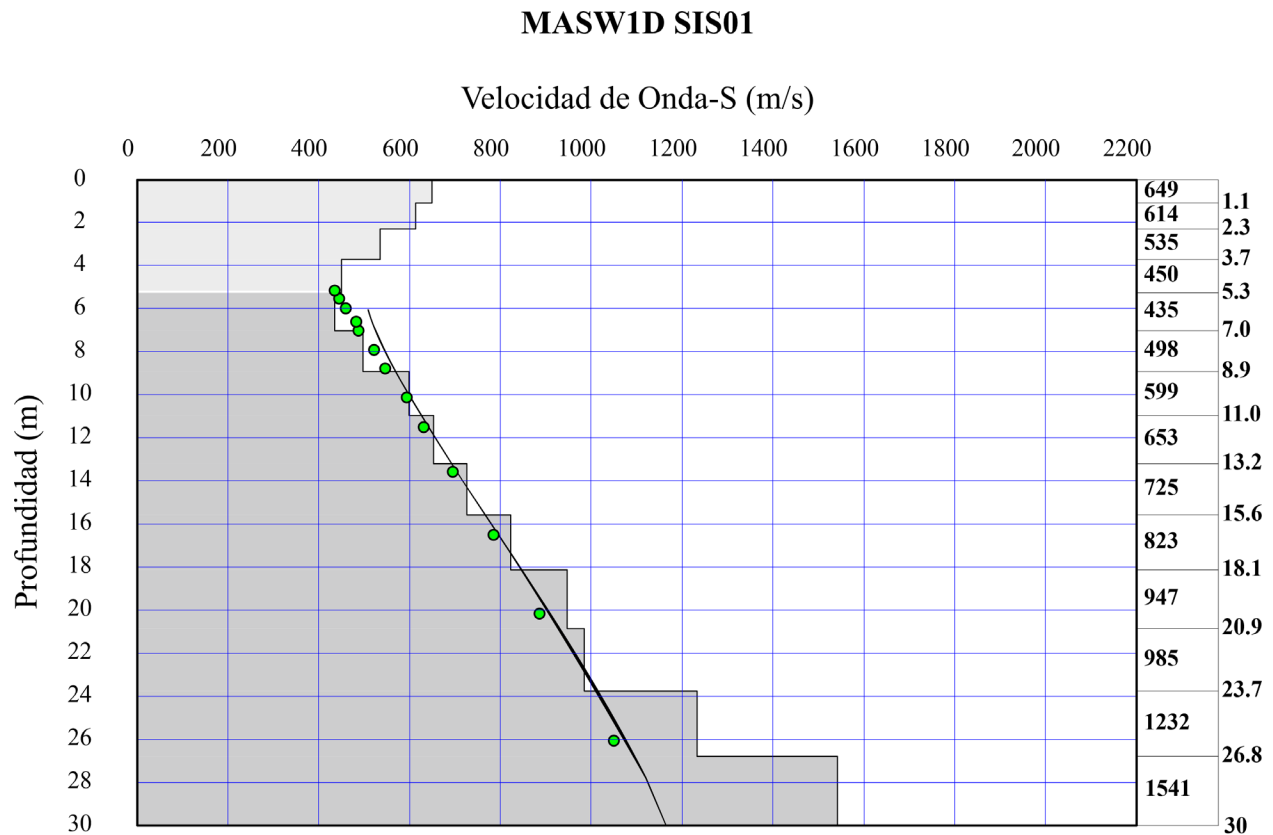


Nota. Modelo final obtenido aplicando el método de Tomografía de Refracción Sísmica por el perfil sísmico SIS01.

El modelo MASW1D para el perfil sísmico SIS01 (Figura 42) evidencia un incremento en profundidad de la velocidad de onda de corte o velocidad de onda S (V_s). El modelo estima velocidades sísmicas entre los 450 m/s y 1541 m/s , con una profundidad máxima de investigación estimada de 60 metros, el rango de confiabilidad del modelo indicado por el software corresponde entre 5,3 y 58 metros (área marcada en gris oscuro). La velocidad media del modelo para los primeros 30 metros (V_{s30}) es de $735,6 \text{ m/s}$. Para la inversión se realizó un total de 5 iteraciones obteniéndose un error RMS de 92,1735 equivalente a un 9,76 %

Figura 42

Modelo del subsuelo en un perfil 1D de la velocidad de onda de corte (V_s) versus la profundidad para la línea 1 (SIS01)



Modelo Velocidad de onda-s (invertido) : Modelo1D_SIS01.rst

V_s promedio 30m = 735.6 m/sec

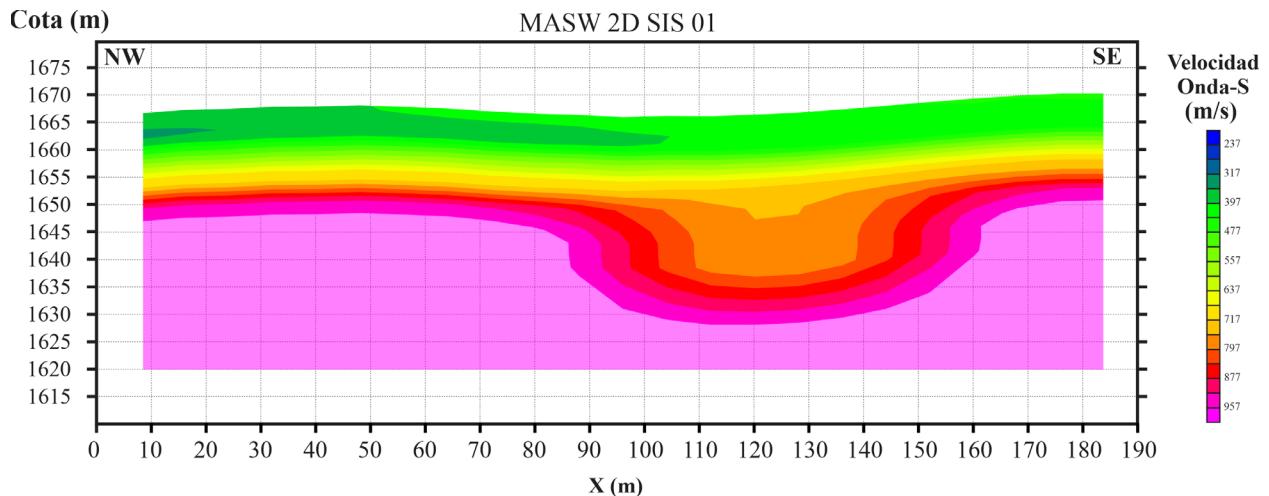
Nota. El modelo 1D del subsuelo de la SIS01 se obtuvo a partir del perfil central.

El modelo obtenido por inversión de MASW2D mantiene la relación de un incremento en la velocidad de la onda tipo S en profundidad, evidenciando dos contrastes significativos en la vertical y horizontal. Estos dos contrastes se evidencian entre las abscisas 90-160 (entre las cotas 1625-1655) del modelo asociado con profundidades promedio entre los 15 y 40 metros (Figura 43), el modelo resuelve con una profundidad de 45 metros. El contraste obtenido en el modelo no

presenta una extensión lateral a la izquierda o NW ni a la derecha o SE, por lo que se generaliza 2 posibles capas en el modelo, y denotando el contraste como una anomalía.

Figura 43

Modelo final del subsuelo 2D de la velocidad de onda de corte (V_s), línea 1 (SIS01).



Nota. Modelo final obtenido aplicando el método de MASW2D para la línea 1 (SIS01).

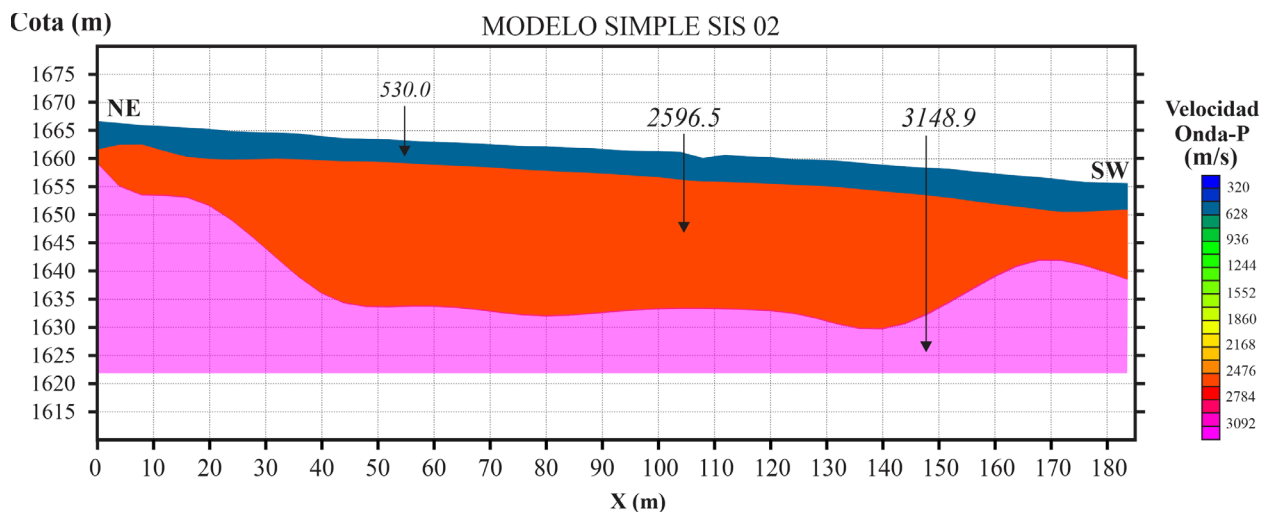
7.1.2.2 Resultados SIS 02.

En el picado de los primeros arribos correspondientes con la onda tipo P (V_p) también se generaron tres rectas con diferente pendiente (correspondiente a dos cambios de pendientes), por lo que se infirieron la presencia de tres capas. El modelo inicial o simple generado ratificó las tres capas, contrastes o cambios verticales en los valores de velocidad del subsuelo, obtenido (Figura 44), para la capa 1 el modelo estima una velocidad de 530 m/s con un espesor promedio de 5 metros, para la capa 2 una velocidad de 2596,5 m/s con espesor promedio de 30 metros, el ultimo refracto relacionado con la capa 3 se estima una velocidad de 3148,9 m/s . El modelo inicial infiere una profundidad de investigación total aproximada de 40 metros, la capa 1 presenta

homogeneidad lateral en su espesor, por el contrario, la capa 2 aparenta un adelgazamiento a la izquierda o NE (entre las abscisas 0-40) y a la derecha o SW (entre las abscisas 140-189) un acuñaamiento.

Figura 44

Modelo preliminar de la velocidad de onda P línea 2 (SIS02)



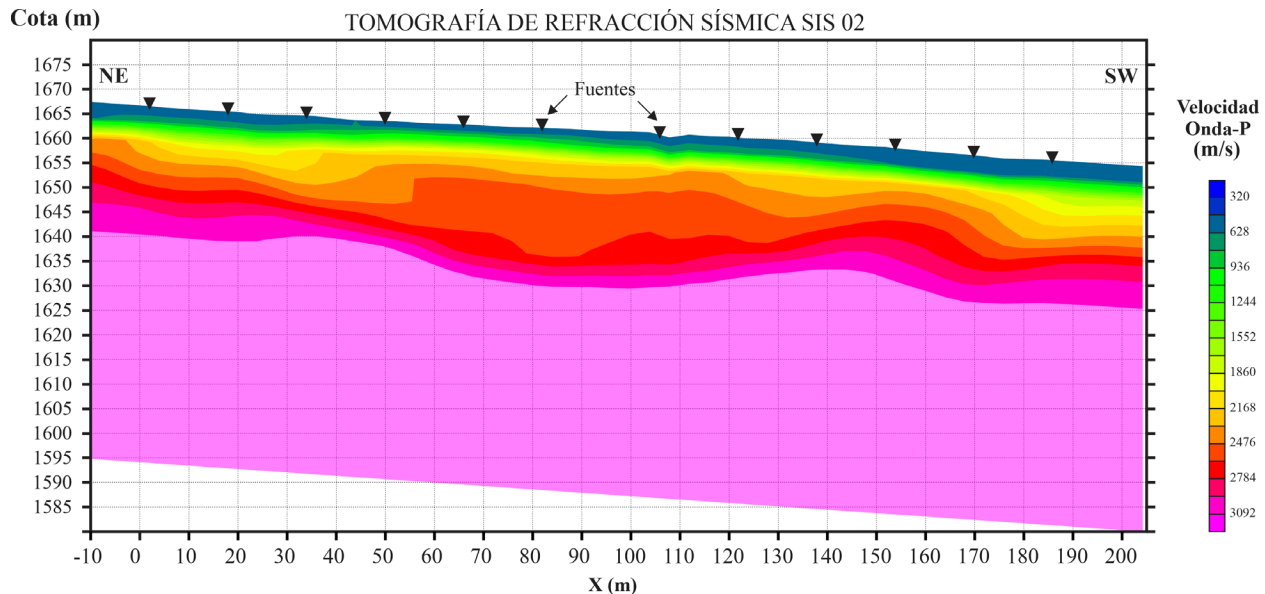
Nota. Modelo simple de la SIS02 con tres capas.

El modelo obtenido por el método de inversión de Tomografía de Refracción Sísmica, partiendo del modelo inicial de refracción, conserva el aumento de velocidad en profundidad (Figura 45), pero con una aparente homogeneidad para la capa 2 al eliminar los adelgazamiento o cambios en la geometría al NW y SE del perfil sísmico. Los rangos de velocidad de onda tipo P presentan una semejanza a los estimados para el perfil SIS 01, para el perfil SIS 02 se estima para la capa 1 velocidades entre 320 – 936 m/s, para la capa 2 velocidades entre 936 – 2784 m/s, y la última capa se estiman una velocidad mayor a 2784 m/s, la profundidad promedio del último refractor o capa 3 en la TRS es de aproximada mente 20 metros (cota 1645).

Figura 45

Tomografía Sísmica de refracción mediante una inversión por mínimos cuadrados línea 2

(SIS02)

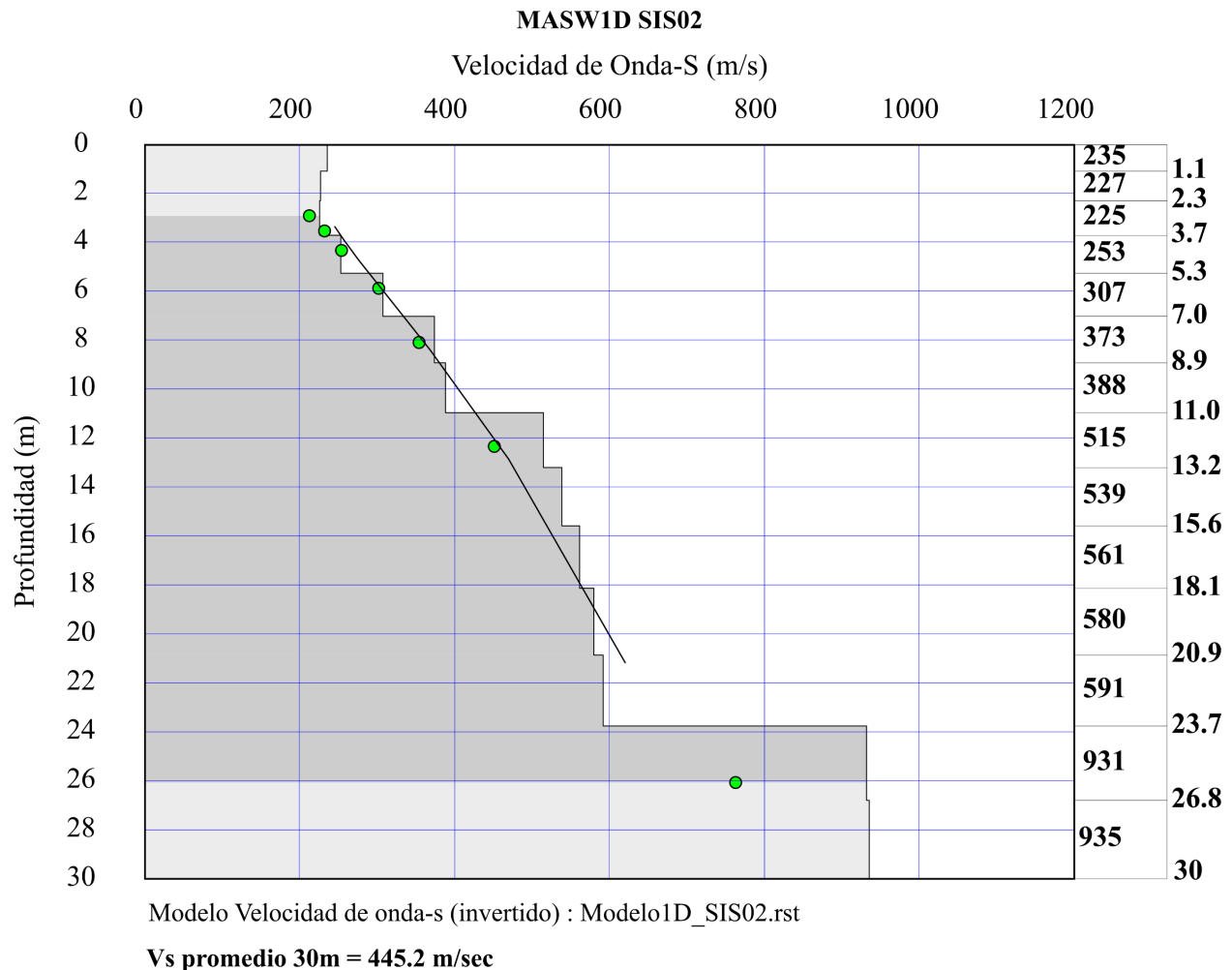


Nota. Modelo final obtenido aplicando el método de Tomografía de Refracción Sísmica por el perfil sísmico SIS02.

El perfil obtenido del modelo MASW1D de SIS02 (Figura 46) respeta el principio de incremento en profundidad de la velocidad de onda de corte o velocidad de onda S (V_s). El modelo estima velocidades sísmicas entre los 253 m/s y 935 m/s , con una profundidad máxima de investigación estimada de 30 metros, el rango de confiabilidad del modelo indicado por el software corresponde entre 3 y 26 metros (área marcada en gris oscuro), por lo que las velocidades de onda de corte dentro de este rango estimadas son de 253 – 931 m/s . La velocidad media del modelo para los primeros 30 metros (V_{s30}) es de 445,2 m/s . Para la inversión se realizó un total de 4 iteraciones obteniéndose un error RMS de 66,5557 equivalente a un 8,5 %.

Figura 46

Modelo del subsuelo en un perfil 1D de la velocidad de onda de corte (V_s) versus la profundidad para la línea 2 (SIS02)



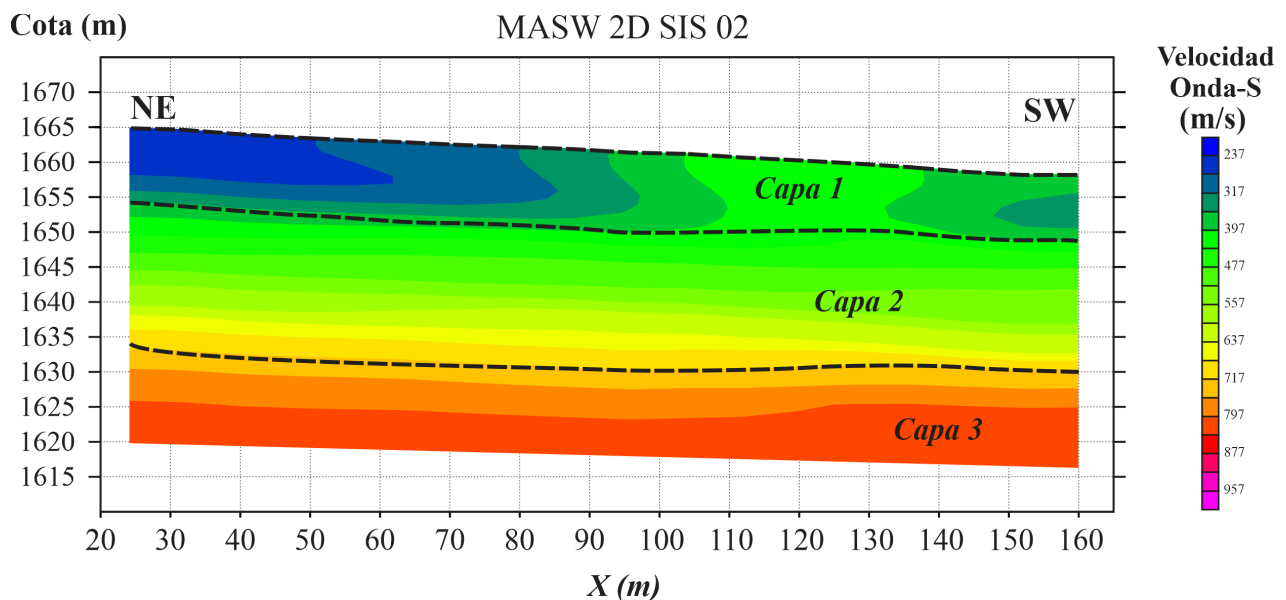
Nota. El modelo 1D del subsuelo de la SIS02 se obtuvo a partir del perfil central.

El modelo obtenido por inversión de MASW2D evidencia un incremento en la velocidad de la onda tipo S (Figura 47) en profundidad similar al MASW1D, evidenciando tres contrastes significativos en la vertical y horizontal. En los primeros 10 a 15 metros en profundidad (cota promedio de 1655) se evidencia una heterogeneidad o contraste lateral del subsuelo, estimando velocidades de onda tipo S entre 237 – 477 m/s, entre las abscisas 0-90 (NE del perfil) y

140-160 (SW del perfil) las velocidades son inferiores a los 317 m/s . A profundidades mayores de los 15 metros no se evidencian contrastes o cambios laterales en los valores de velocidad de la onda tipo S, pero si un contraste vertical a una profundidad aproximada de 30 metros (cota promedio de 1635) donde de una velocidad promedio de 557 m/s se genera un incremento a una velocidad promedio de 877 m/s .

Figura 47

Modelo final del subsuelo 2D de la velocidad de onda de corte (V_s), línea 2 (SIS02).



Nota. MASW2D de los datos obtenidos en la SIS02.

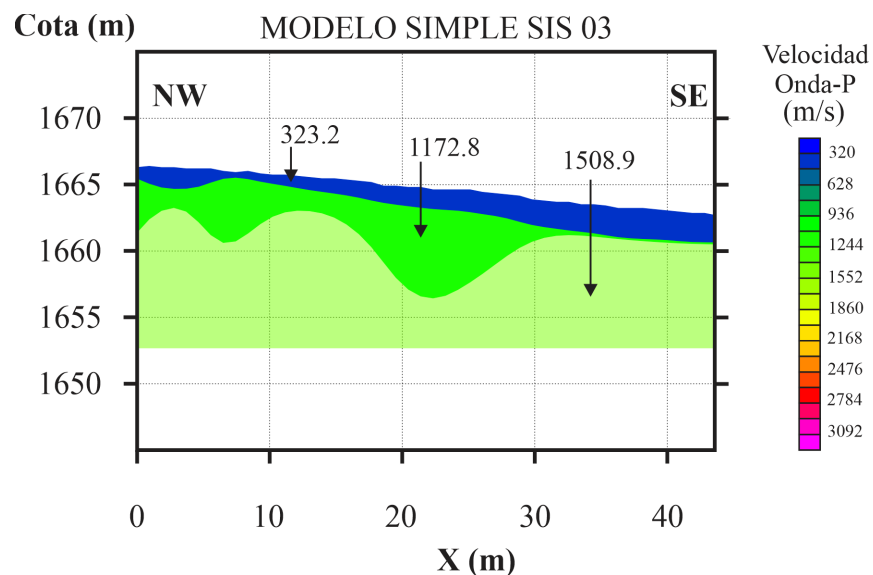
7.1.2.3 Resultados SIS 03.

En el proceso de picado de los primeros arribos correspondientes con la onda tipo P (V_p) se evidenciaron tres rectas con diferente pendiente (correspondiente a dos cambios de pendientes) infiriendo la presencia de tres capas para la SIS 03. El modelo inicial obtenido (Figura 48) estima para la capa 1 una velocidad de 323,2 m/s con un espesor promedio de 2 metros, para la capa 2

una velocidad de 1172,8 m/s con espesor promedio de 5 metros, el ultimo refractor relacionado con la capa 3 se estima una velocidad de 1508,9 m/s . El modelo inicial infiere una profundidad de investigación total aproximada de 10 metros, la capa 1 conserva una homogeneidad lateral en su espesor similar a lo observado en la SIS 01 y SIS 02. Pero, la capa 2 evidencia cambios laterales y verticales en su geometría, con un espesor promedio de 3 metros a la izquierda o NW del perfil (entre las abscisas 0-15), en el centro del perfil (entre las abscisas 20-25) su mayor potencia con 7 metros de espesor aproximadamente, y con aparente adelgazamiento a la derecha o SE (entre las abscisas 30-40).

Figura 48

Modelo preliminar de la velocidad de onda P línea 3 (SIS03)



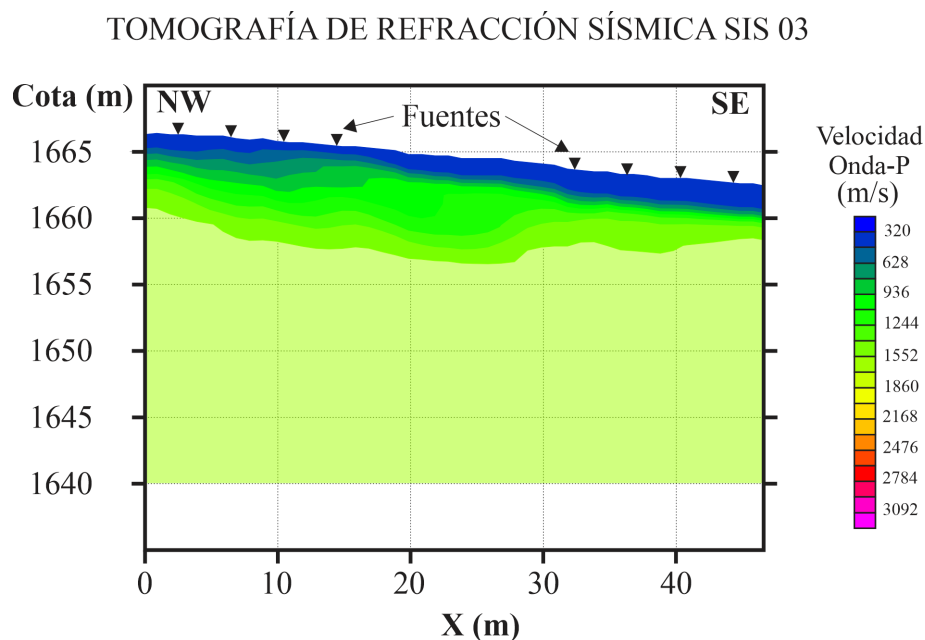
Nota. Modelo simple de la SIS03 con tres capas.

El modelo obtenido por el método de inversión de Tomografía de Refracción Sísmica, aunque consideró el modelo inicial de refracción, corresponde a un modelo más suavizado u homogéneo lateralmente, conservando el aumento de velocidad en profundidad (Figura 49). El modelo recuperado de TRS permite diferenciar dos contrastes verticales, inferidos como tres

capas, para la capa 1 estima velocidades entre 320 m/s – 628 m/s , capa 2 estima velocidades entre 936 m/s – 1244 m/s y la última capa tiene una velocidad inferida de 1800 m/s , la profundidad promedio del último refractor o capa 3 en la TRS es de aproximada mente 5 metros (cota promedio de 1660).

Figura 49

Tomografía Sísmica de refracción mediante una inversión por mínimos cuadrados línea 3 (SIS03)

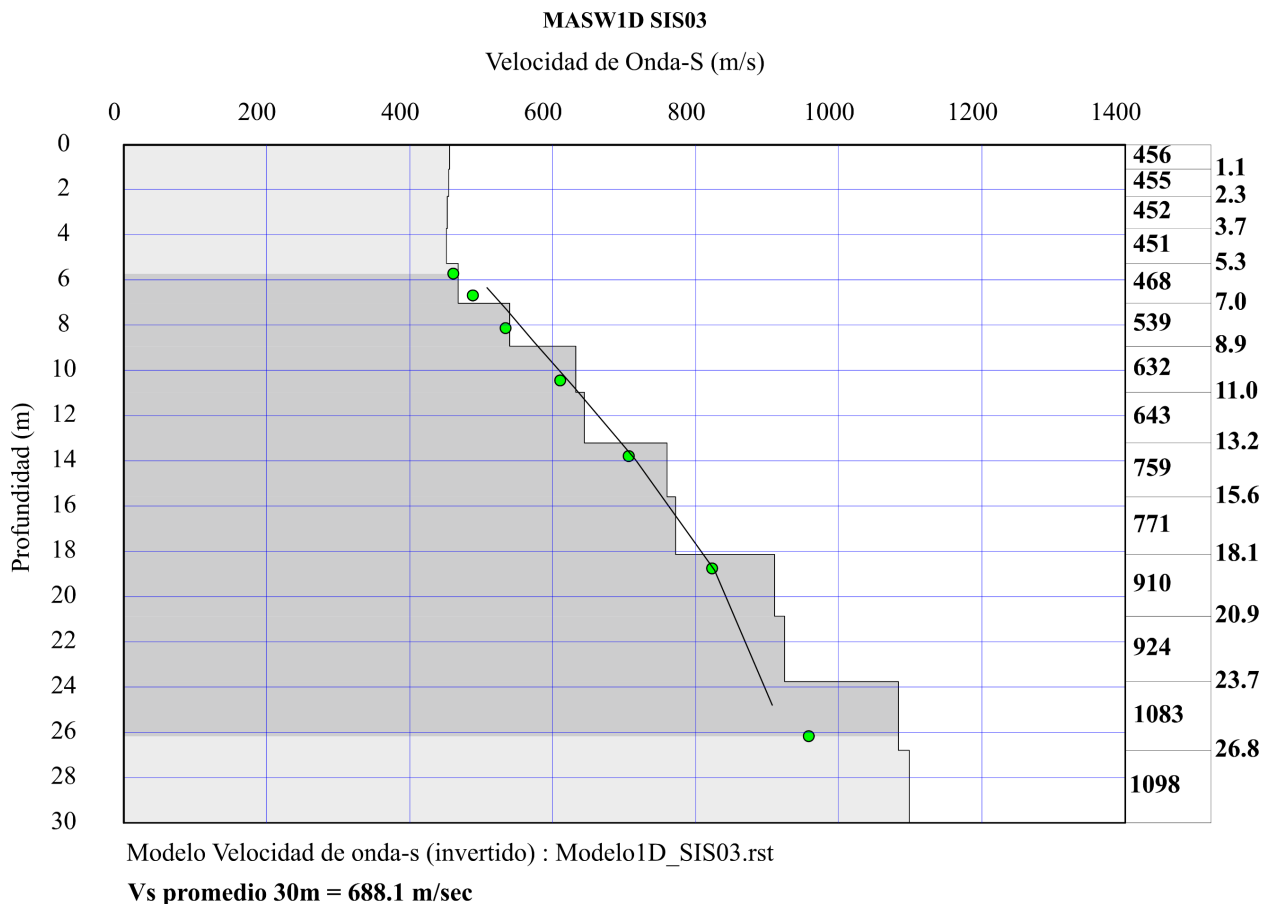


Nota. Modelo final obtenido aplicando el método de Tomografía de Refracción Sísmica por el perfil sísmico SIS03.

El perfil obtenido del modelo MASW1D de SIS03 (Figura 50) no presentó inconvenientes en su procesamiento, el cual conservó un incremento en profundidad de la velocidad de onda de corte o velocidad de onda S (V_s). El modelo estima velocidades sísmicas que oscilan entre 456 – 1098 m/s , con una profundidad máxima de 30 metros, aun así, el intervalo de confianza en profundidad es entre los 5,8 y 26 metros de profundidad.

Figura 50

Modelo del subsuelo en un perfil 1D de la velocidad de onda de corte (V_s) versus la profundidad para la línea 3 (SIS03)



Nota. El modelo 1D del subsuelo de la SIS03 se obtuvo a partir del perfil central.

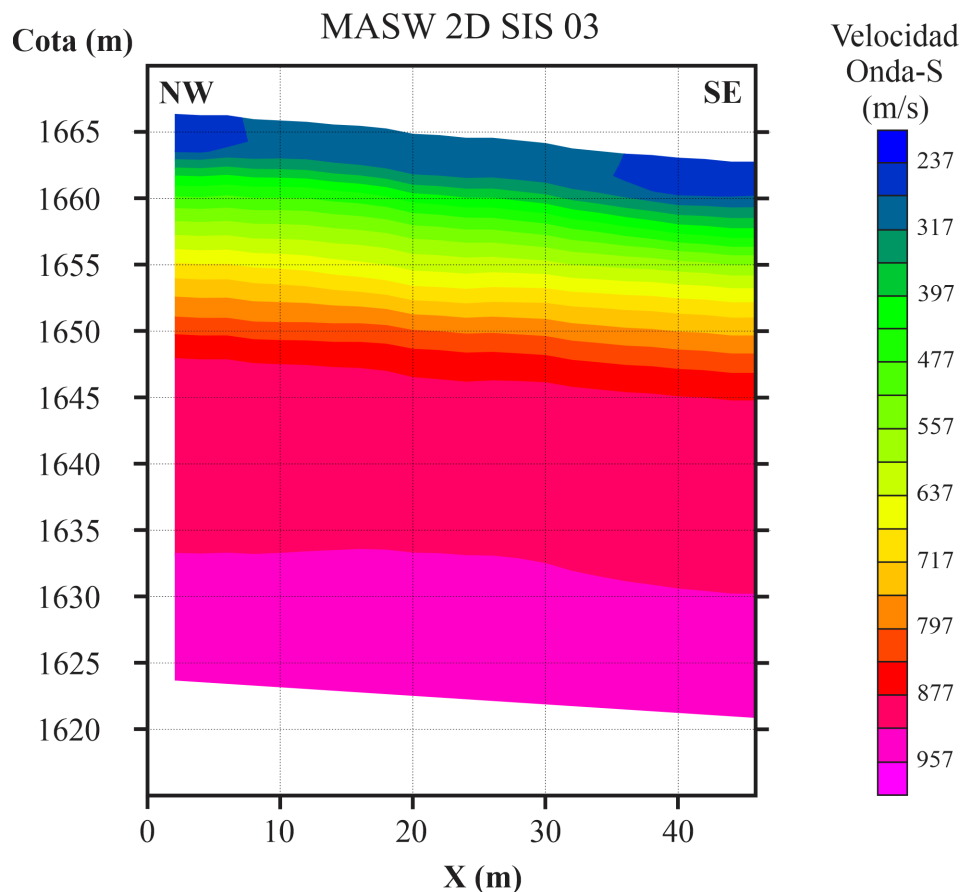
Para este rango de profundidades, las velocidades están en el rango de 456 – 1083 m/s, con una velocidad promedio del modelo o V_{s30} es de 688.1 m/s. Para la inversión se realizó un total de 5 iteraciones obteniéndose un error RMS de 41,4310 m/s equivalente a un 6,12%.

El modelo obtenido por inversión de MASW2D para el perfil SIS 03 no presentó inconvenientes en su generación, y conservó el incremento en la velocidad de la onda tipo S (Figura 51) en profundidad similar al MASW1D. Dos contrastes significativos en la vertical se

evidencian en la SIS 03, asociados con tres capas, los primeros 2 metros en profundidad (cota promedio de 1662) se evidencia un cambio mínimo lateral en los valores de velocidad, estimando velocidades de onda tipo S promedio de 237 m/s. A profundidades entre los 2 y 10 metros (cotas 1662 y 1652 aproximadamente) no se evidencian contrastes o cambios laterales en los valores de velocidad de la onda tipo S, con velocidades promedio de 397 m/s; a profundidades mayores se estima un incremento a una velocidad promedio de 797 m/s.

Figura 51

Modelo final del subsuelo 2D de la velocidad de onda de corte (V_s), línea 3 (SIS03).



Nota. MASW2D de los datos obtenidos en la SIS03.

7.1.3 Cálculo Módulos Elásticos

Para el cálculo de los módulos elásticos se consideraron los valores de velocidad de onda tipo P (TRS) y tipo S (MASW2D) obtenidos de los procesos de inversión de los datos de sísmica, los cuales fueron reemplazados en las respectivas ecuaciones. La confiabilidad o certidumbre de estos cálculos se asocian con el rango de confianza estimado por la inversión de MASW1D, por lo que se denotó con un tono gris las profundidades de mayor confiabilidad.

7.1.3.1 Módulos Elásticos SIS01.

El cálculo de los módulos elásticos corresponde con el centro o abscisa $X = 94$ metros del perfil sísmico SIS 01 (Tabla 8), el rango de profundidad de confiabilidad es entre los 5 a 27 metros. Un contraste o cambio en los valores de los módulos se estima aproximadamente a los 11 metros de profundidad, punto en el cual la relación V_p/V_s es de 3,437; esta relación en el perfil presenta una disminución en profundidad, pasando de 4,174 (5 metros en profundidad) a 2,077 (5 metros en profundidad).

Tabla 8

Parámetros elásticos estimados para la SIS 01 en la abscisa $X=94$ metros

Z (m)	V_p	V_s	Relación V_p/V_s	Possion	Densidad	Rigidez	Young	Bulk
	Velocidades			σ	ρ	G	E	K
	m/s	m/s		Adimensional	kg/m^3	MPa	MPa	MPa
5	1818,70	435,648	4,174	0,47	2024,43	384,21	1129,25	6183,87
7	2161,17	498,302	4,337	0,47	2113,65	524,83	1545,02	9172,36
9	2212,34	599,094	3,692	0,46	2126,05	763,07	2228,82	9388,40
11	2246,58	653,572	3,437	0,45	2134,24	911,65	2650,67	9556,24
13	2268,34	725,930	3,124	0,44	2139,38	1127,40	3253,56	9504,67
16	2341,06	823,194	2,843	0,43	2156,33	1461,23	4177,53	9869,55
18	2411,73	947,391	2,545	0,41	2172,42	1949,85	5493,77	10035,93

21	2664,46	985,042	2,704	0,42	2227,22	2161,09	6141,15	12930,38
24	2964,26	1232,587	2,404	0,40	2287,39	3475,17	9699,04	15465,45
27	3202,33	1541,486	2,077	0,35	2332,00	5541,25	14952,53	16526,10

Nota. Z se refiere a la profundidad.

7.1.3.2 Módulos Elásticos SIS02.

El cálculo de los módulos elásticos corresponde con el centro o abscisa $X = 94$ metros del perfil sísmico SIS 02 (Tabla 9), el rango de profundidad de confiabilidad es entre los 2 a 27 metros. Dos contrastes o cambios en los valores de los módulos se estima aproximadamente a los 5 y 11 metros de profundidad, la relación V_p/V_s es de 5,939 y 4,538 respectivamente. La relación V_p/V_s un valor máximo de 6,005 a los 2 metros de profundidad y disminuye en profundidad hasta una relación de 4,375 correspondiente a los 27 metros en profundidad.

Tabla 9

Parámetros elásticos estimados para la SIS 02 en la abscisa $X=94$ metros

Z (m)	V_p	V_s	Relación V_p/V_s	Poission	Densidad	Rigidez	Young	Bulk
	Velocidades			σ	ρ	G	E	K
	m/s	m/s		Adimensional	kg/m^3	MPa	MPa	MPa
2	841,67	225,63	3,730	0,46	1669,73	85,00	248,42	1069,52
4	1523,21	253,65	6,005	0,49	1936,65	124,60	370,24	4327,24
5	1828,86	307,90	5,939	0,49	2027,25	192,19	570,95	6524,37
7	2232,19	373,69	4,788	0,49	2130,81	297,56	884,09	10220,33
9	2325,52	388,28	4,629	0,49	2152,74	324,55	964,33	11209,43
11	2467,42	515,23	4,538	0,48	2184,85	579,99	1713,54	12528,38
13	2495,35	539,00	4,417	0,48	2191,01	636,54	1878,47	12794,22
16	2549,64	561,73	4,538	0,47	2202,83	695,08	2049,77	13393,06
18	2562,30	580,04	4,417	0,47	2205,56	742,04	2186,05	13490,95
21	2589,20	591,78	4,375	0,47	2211,33	774,40	2280,53	13792,16
24	2637,72	931,77	2,830	0,43	2221,62	1928,81	5511,42	12885,32
27	2807,11	935,20	3,001	0,44	2256,45	1973,50	5674,11	15149,26

Nota. Z se refiere a la profundidad.

7.1.3.3 Módulos Elásticos SIS03.

El cálculo de los módulos elástico corresponde con el centro o abscisa $X = 23,5$ metros del perfil sísmico SIS 03 (Tabla 10), el rango de profundidad de confiabilidad es entre los 5 a 18 metros. Dos contrastes o cambios en los valores de los módulos se estiman aproximadamente a los 7 y 13 metros de profundidad, la relación V_p/V_s es de 2,809 y 2,078 respectivamente, en profundidad se estiman cambios representativos en la relación V_p/V_s .

Tabla 10

Parámetros elásticos estimados para la SIS 03 en la abscisa $X=23.5$ metros.

Z (m)	V_p	V_s	Relación V_p/V_s	Poission	Densidad	Rigidez	Young	Bulk
	Velocidades			σ	ρ	G	E	K
	m/s	m/s		Adimensional	kg/m^3	MPa	MPa	MPa
5	1202,03	468,34	2,566	0,41	1825,33	400,37	1129,45	2103,57
7	1515,54	539,52	2,809	0,43	1934,21	563,02	1607,35	3691,89
9	1579,14	632,16	2,497	0,40	1954,19	780,95	2193,82	3831,86
11	1579,14	643,86	2,452	0,40	1954,19	810,13	2268,86	3792,96
13	1579,14	759,60	2,078	0,35	1954,19	1127,56	3043,25	3369,71
16	1579,14	771,87	2,045	0,34	1954,19	1164,27	3127,33	3320,77
18	1579,14	910,67	1,734	0,25	1954,19	1620,64	4054,40	2712,27

Nota. Z se refiere a la profundidad.

7.2 Medición directa del nivel estático

Durante las labores de adquisición geofísica uno de los habitantes de la Mesa de Los Santos indicó la presencia de un pozo próximo al área de estudio, por lo que se realizó la medición directa del nivel de agua en el pozo usando una sonda de nivel el día 10 de septiembre de 2023 en las coordenadas $X= 1'109.573$ $Y= 1'246.809$ (Figura 52).

Figura 52

Medición directa del nivel estático en un predio de la vereda la Fuente



La sonda se introdujo en el pozo hasta que llegó al fondo, punto en el que dejó un tiempo de 1 a 2 minutos para que se estabilizara y poder registrar la medición con un mínimo error. El medidor indicó que el nivel estático del líquido se encontraba a una profundidad de 2,6 metros, este resultado indica la altura del agua presente en el pozo en un momento específico, el nivel estático puede variar con el tiempo debido a factores como la lluvia, la evaporación y el bombeo del pozo, por lo que es recomendable realizar mediciones periódicas para monitorear los cambios en el nivel estático.

8. Análisis de resultados

La medición directa del nivel freático fue comparada con los resultados indirectos de las Tomografías de Resistividad Eléctrica, Sísmica de Refracción y MASW para inferir el comportamiento del nivel freático. Los valores de resistividad establecidos por Hincapié & Veloza (2009) (Tabla 7) fueron considerados en la interpretación de las TRE; para inferir el comportamiento o características del subsuelo se inició considerando la Norma Sismo Resistente NSR-10 y la Normativa Internacional ASTM D5777 para establecer posibles cambios (producto a meteorización, fracturamiento, etc.) del material de roca en el subsuelo. Un análisis en conjunto de los resultados de las TRE, TRS y MASW fueron realizado considerando la información disponible de la geología local para la generación de los modelos esquemáticos que permitan ejemplificar el comportamiento del nivel freático y dar respuesta la hipótesis planteada en el área de estudio.

8.1 Discusión Resultados Geoeléctrica

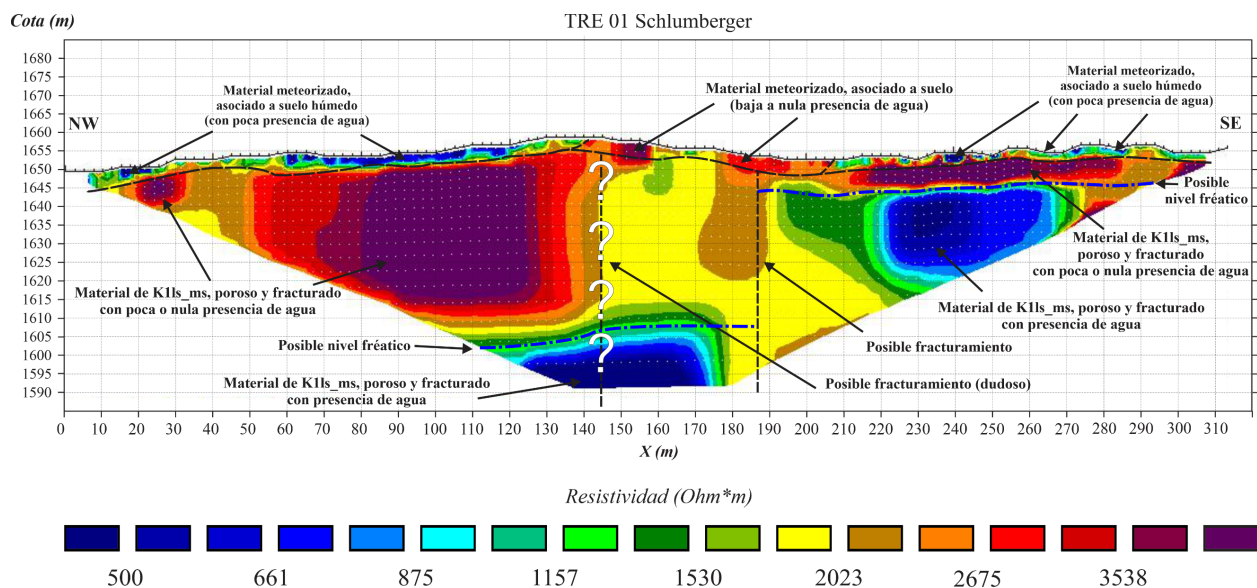
8.1.1 Interpretación TRE 01

Los contrastes de resistividad identificados en la TRE 01 se asocian a cambios en el material de suelo o roca (Figura 53), en los primeros 5 metros de profundidad hay zonas que se interpretan como material meteorizado asociado a suelo posiblemente húmedo (valores bajos de resistividad) y material meteorizado asociado a suelo seco (mayores valores de resistividad). Incrementando en profundidad, se infieren dos zonas de interés, las cuales se asocian con posible material de roca saturado en agua (tonos azules), asociándolo con la posible presencia del nivel freático a 15 y 45 metros de profundidad. Geológicamente el área de estudio corresponde con material perteneciente al Miembro Superior de la Formación Los Santos, y próximo a la Falla

Potreros, los contrastes laterales en la resistividad del perfil se interpretan como dos posibles fracturas. El lineamiento inferido como fractura localizada hacia el SE de la TRE 01 estaría aislando las dos zonas saturadas de interés; la continuidad vertical de estas fracturas no evidencia una conexión con la superficie, infiriéndose que están cubiertas, debido a la incertidumbre al no existir afloramientos de roca en superficie, los lineamientos podrían corresponder a un plano de falla. Los valores altos de resistividad (colores rojos a morados) estimados al NW de la TRE 01 se infieren como material poroso, fracturado con poca o nula presencia de agua perteneciente al Miembro Superior de la Formación Los Santos.

Figura 53

Tomografía de resistividad eléctrica TRE 01 interpretada



Nota: K11s_ms: Miembro Superior de la Formación Los Santos.

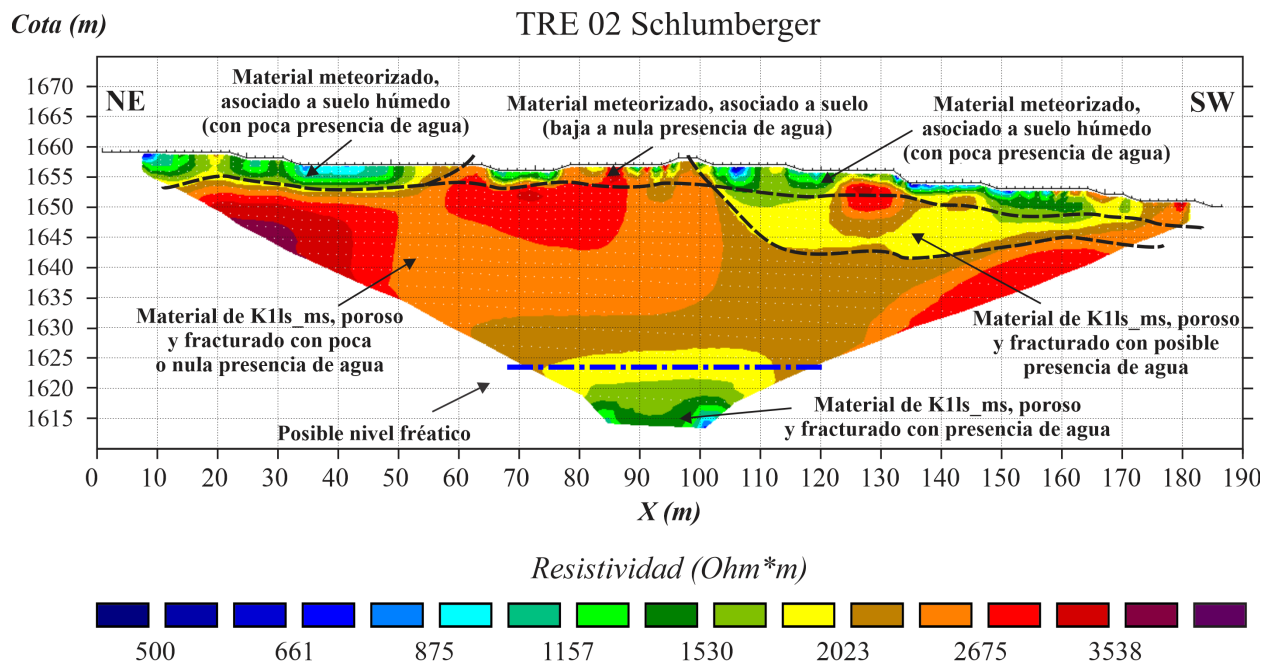
8.1.2 Interpretación TRE 02

En la TRE 02 (Figura 54) los contrastes de resistividad de los primeros 5 metros de profundidad asociados con zonas de bajas resistividades (colores azules) son interpretadas como material meteorizado asociado a suelo húmedo, y las zonas donde los valores de resistividad son

altos (colores rojos) se interpretan como material meteorizado asociado a suelo. Aproximadamente a los 10 metros de profundidad se encuentran zonas posiblemente como moderadamente saturadas (colores amarillos) que fueron interpretadas como material del Miembro Superior de la Formación Los Santos poroso y fracturado, que se encuentran infrayaciendo al material meteorizado asociado a suelos húmedos. El posible nivel freático se infiere su localización a los 35 metros de profundidad, representado por el contraste de resistividad que el modelo presenta a esta profundidad, donde el material que lo conforma se interpreta como poroso, fracturado con presencia de agua perteneciente al Miembro Superior de la Formación Los Santos.

Figura 54

Tomografía de resistividad eléctrica TRE 02 interpretada



Nota: K1ls_ms: Miembro Superior de la Formación Los Santos.

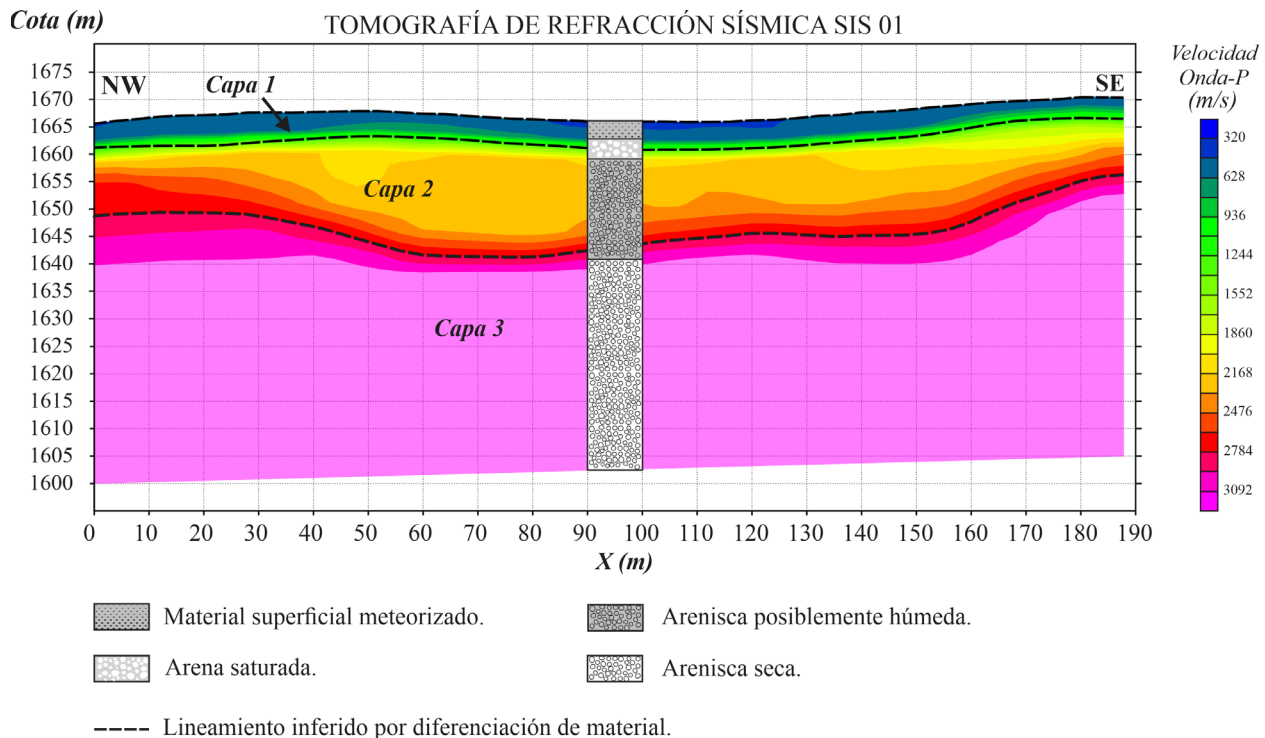
8.2 Clasificación del perfil del suelo mediante las normas ASTM D5777 y NSR-10

8.2.1 Interpretación SIS01

La clasificación del suelo (norma ASTM D5777) de los resultados de la Tomografía de Refracción Sísmica se considera una clasificación de cuatro capas (Figura 55); la primera capa tiene un espesor de 2 metros y corresponde a material superficial meteorizado. La segunda capa de 1 metro de espesor se asocia a arena saturada; la tercera capa con un espesor de aproximadamente 14 metros correspondería a arenisca que posiblemente se encuentre húmeda, finalmente, la última capa se interpreta como arenisca.

Figura 55

Tomografía de Refracción Sísmica SIS 01 interpretada

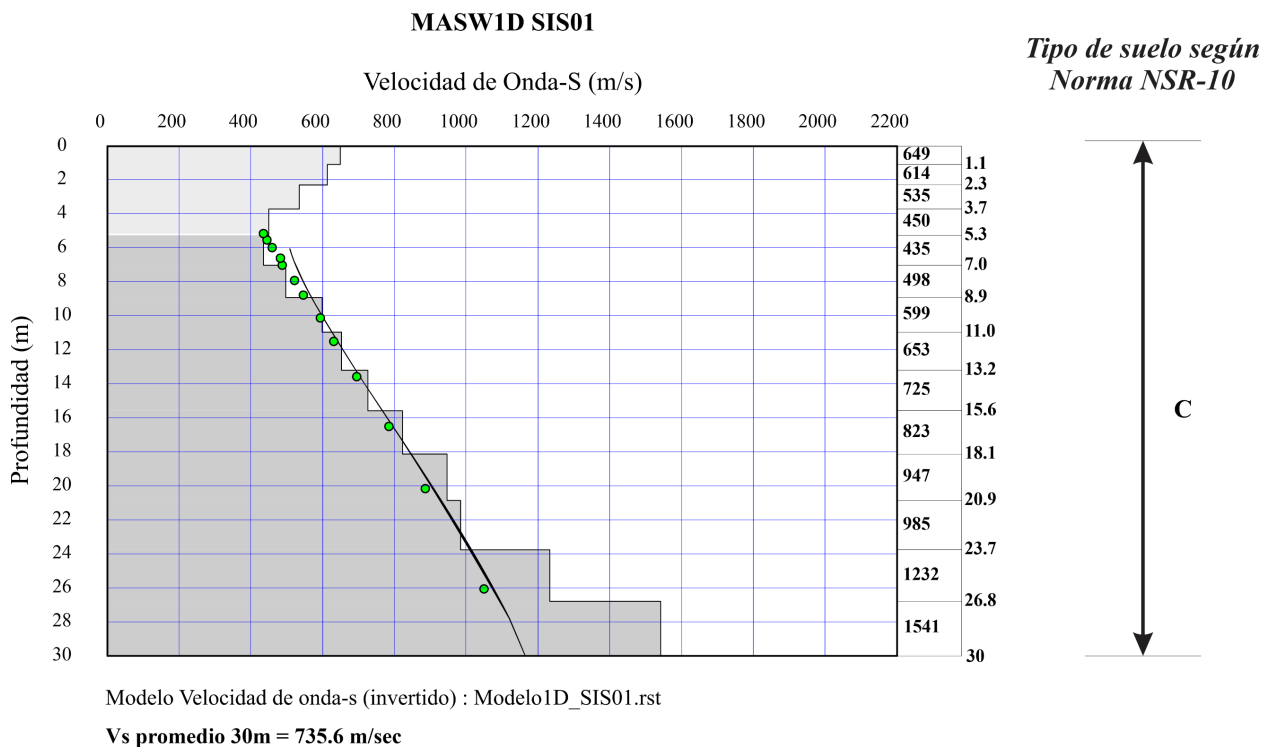


Nota: Clasificación de los perfiles de suelo considerando los valores de velocidad de onda P, según la Norma ASTM D5777.

Para realizar la clasificación del perfil obtenido en MASW1D respecto al tipo de suelo se utilizó la norma NSR-10, en el resultado obtenido se observa la variación de la onda de corte o V_s a medida que aumenta la profundidad, se obtuvieron velocidades en el rango de los 450 m/s a 1541,48 m/s , obteniendo una velocidad promedio para la línea 1 SIS01 de $V_{s30} = 735,6 m/s$, de acuerdo con la velocidad promedio obtenida se asocia a un suelo tipo C que se relaciona con suelo muy denso o de roca blanda que cumpla con el criterio de velocidad de onda cortante (Figura 56).

Figura 56

MASW1D en el centro de la línea 1 SIS01



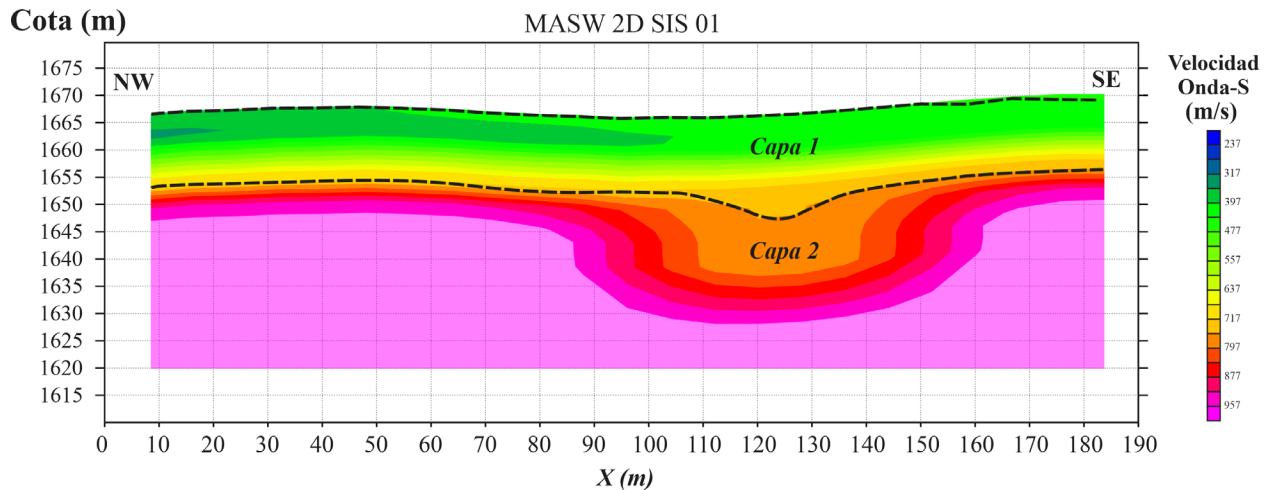
Nota. Modelo de Velocidad de Onda S obtenido por medio del método de MASW 1D para el perfil sísmico SIS01, obteniendo un V_{s30} de **735,6 m/s** .

Para el modelo de MASW2D obtenido se realizó la clasificación de acuerdo con los valores obtenidos de V_s (Figura 57), y se determinaron dos capas, la primera capa presenta velocidades en

el rango de los $397 - 727 \text{ m/s}$. La segunda capa presenta velocidades de V_s entre $727 - 957 \text{ m/s}$

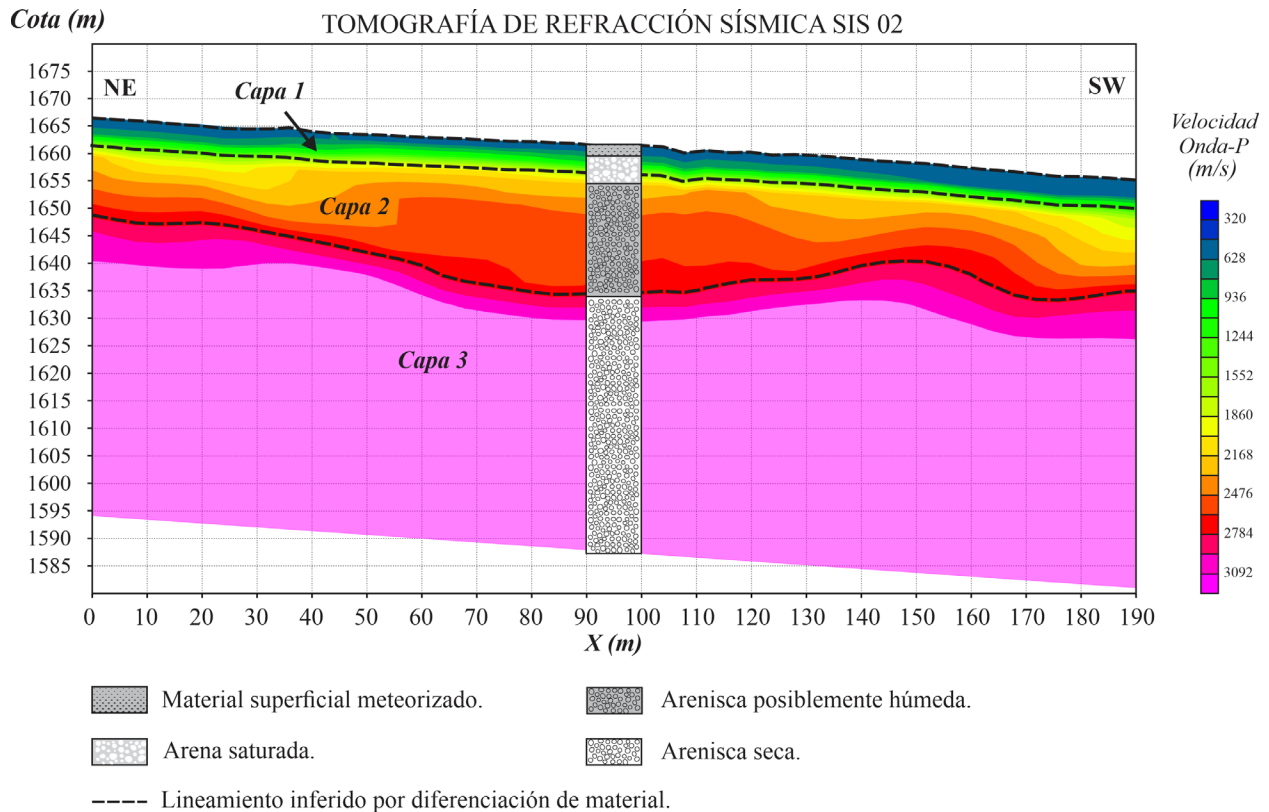
Figura 57

MASW2D SIS01 interpretada



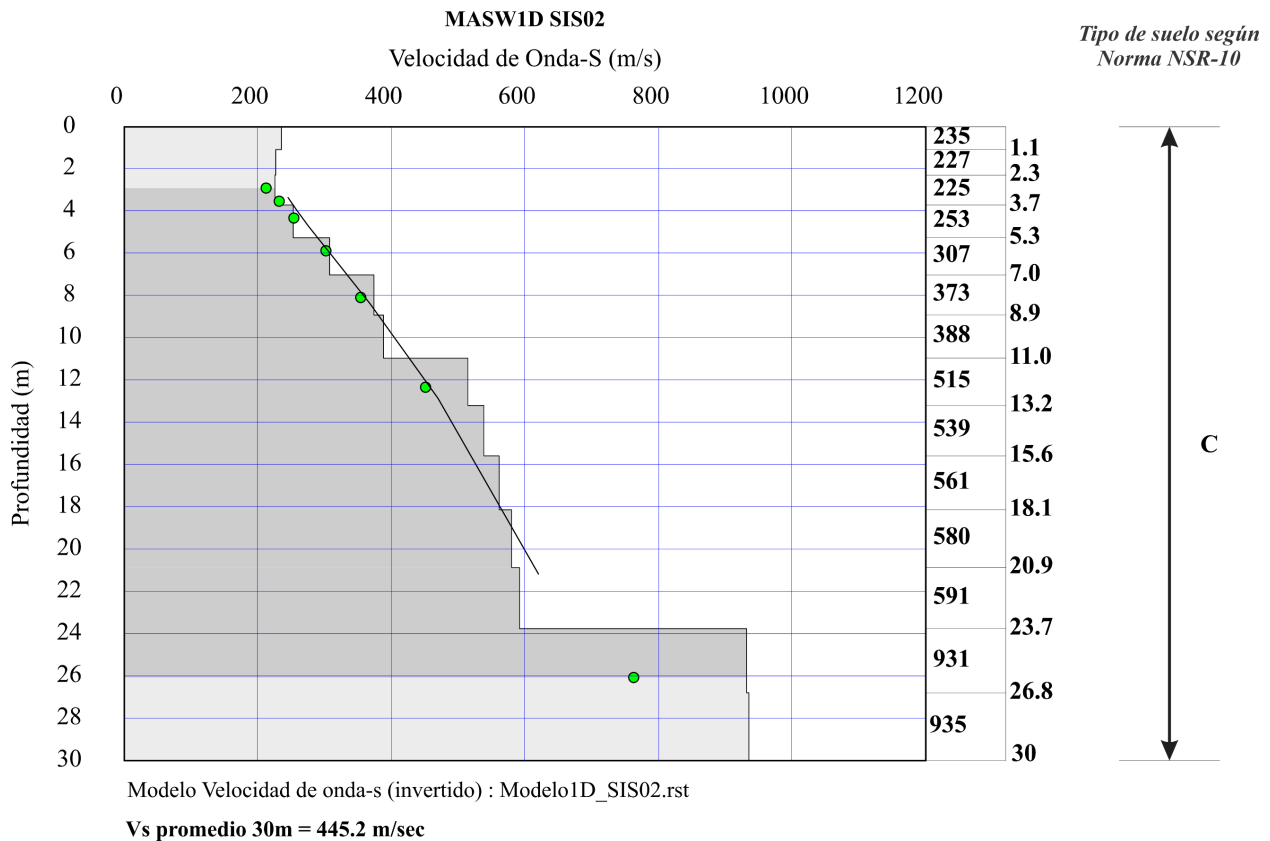
8.2.2 Interpretación SIS02

En la TRS del perfil SIS 02 se identifican cuatro capas (Figura 58), la primera capa tiene un espesor de 1 metro y se compone de material superficial meteorizado, la segunda capa con un espesor de 3 metros se compone de arena saturada, la tercera capa tiene un espesor aproximado de 20 metros y se compone de arenisca que podría estar húmedo, por último, la cuarta capa está compuesta por arenisca.

Figura 58*Tomografía de Refracción Sísmica SIS 02 interpretada*

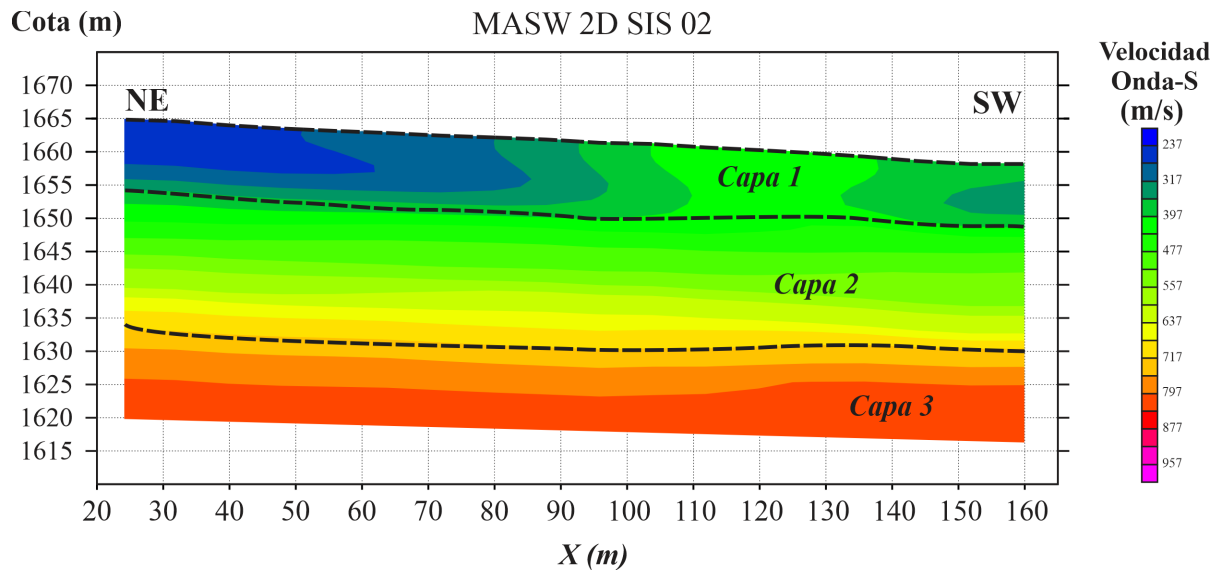
Nota: Clasificación de los perfiles de suelo considerando los valores de velocidad de onda P, según la Norma ASTM D5777.

En el modelo obtenido en MASW1D para la línea 2 se evidencia el aumento de la velocidad a medida que va aumentando la profundidad, teniendo en cuenta la velocidad de onda de corte o V_s se realizó la clasificación del tipo de suelo según la norma NSR-10, para esta línea se obtuvieron velocidades en el rango de los 225 m/s a los 935 m/s, estableciendo un valor promedio de $V_{s30} = 445,2$ m/s, de acuerdo con ese valor promedio se clasifica como suelo tipo C asociado con perfiles de suelos muy densos o roca blanda que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante (Figura 59).

Figura 59*MASW1D en el centro de la línea SIS 02*

Nota. Modelo de Velocidad de Onda S obtenido por medio del método de MASW 1D para el perfil sísmico SIS02, obteniendo un V_{S30} de **445, 2 m/s**.

El modelo MASW2D se dividió en tres capas de acuerdo con los valores obtenidos para V_s (Figura 60), la primera capa presenta velocidades entre 237 – 360 m/s y tiene un espesor de aproximadamente 15 metros, la segunda capa presenta rangos de V_s entre 360 – 717 m/s y tiene un espesor de 20 metros. Finalmente, la tercera capa presenta rangos de velocidad de onda S entre 717 – 957 m/s, obteniendo los mayores rangos de velocidad para esta línea.

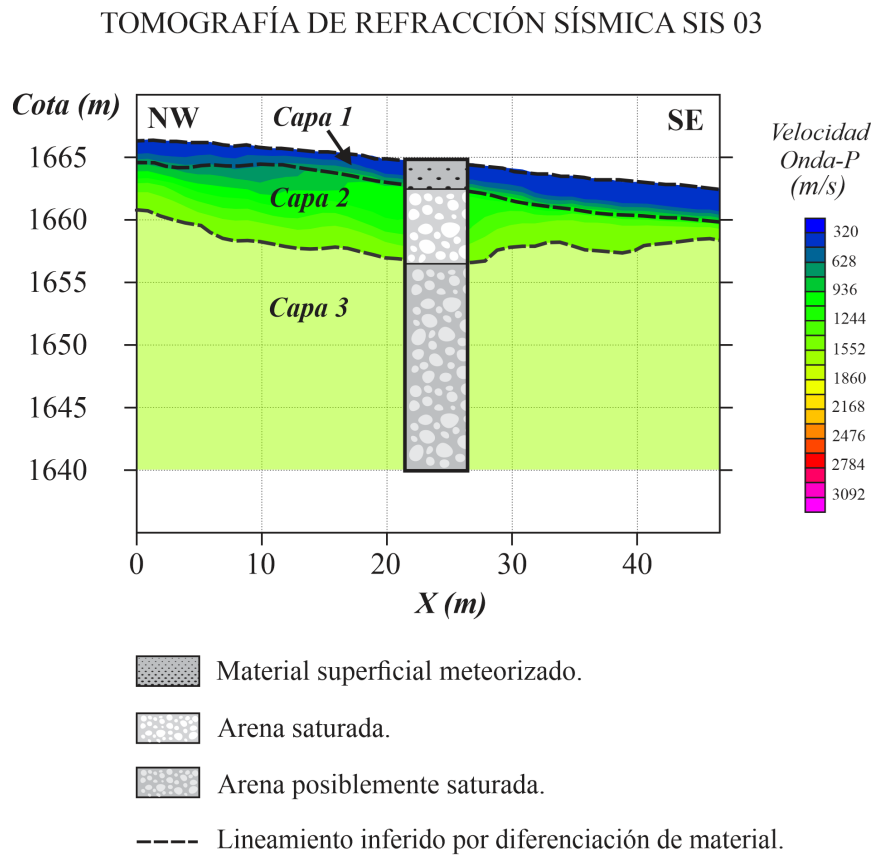
Figura 60*MASW2D SIS 02 interpretada*

8.2.3 Interpretación SIS03

El modelo de TRS del perfil SIS 03 se clasifica en tres capas (Figura 61), la primera capa con un espesor de 1 metro está compuesta por material superficial que ha sufrido meteorización, la segunda capa cuyo espesor se estima en 6 metros se clasifica como arena saturada. Por último, la última capa se compone de arenisca que podría estar húmeda.

Figura 61

Tomografía de Refracción Sísmica SIS 03 interpretada



Nota: Clasificación de los perfiles de suelo considerando los valores de velocidad de onda P, según la Norma ASTM D5777.

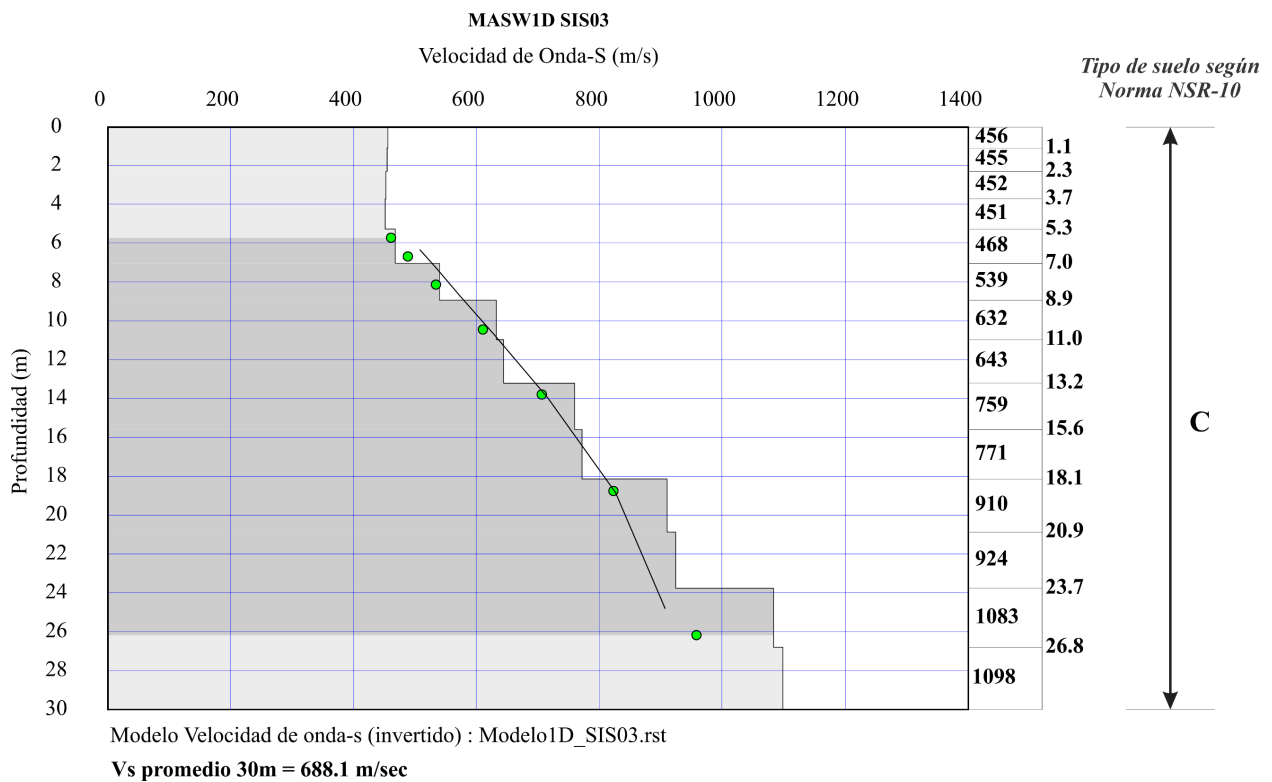
En el modelo MASW1D del perfil SIS03 se obtuvieron velocidades para la onda cortante o V_s en el rango de 468 m/s a 910 m/s, en donde se determinó un valor promedio $V_{s30} = 688,1$ m/s, de acuerdo con lo establecido en la norma NSR-10 los valores obtenidos para V_{s30} corresponden a un suelo tipo C asociado con un perfil de suelo muy denso o roca blanda que cumpla con el criterio de velocidad de onda cortante (Figura 62).

Para el modelo MASW2D se determinaron 3 capas de suelo a partir de los valores obtenidos por V_s (Figura 63), la primera capa tiene un espesor de aproximadamente 2 metros

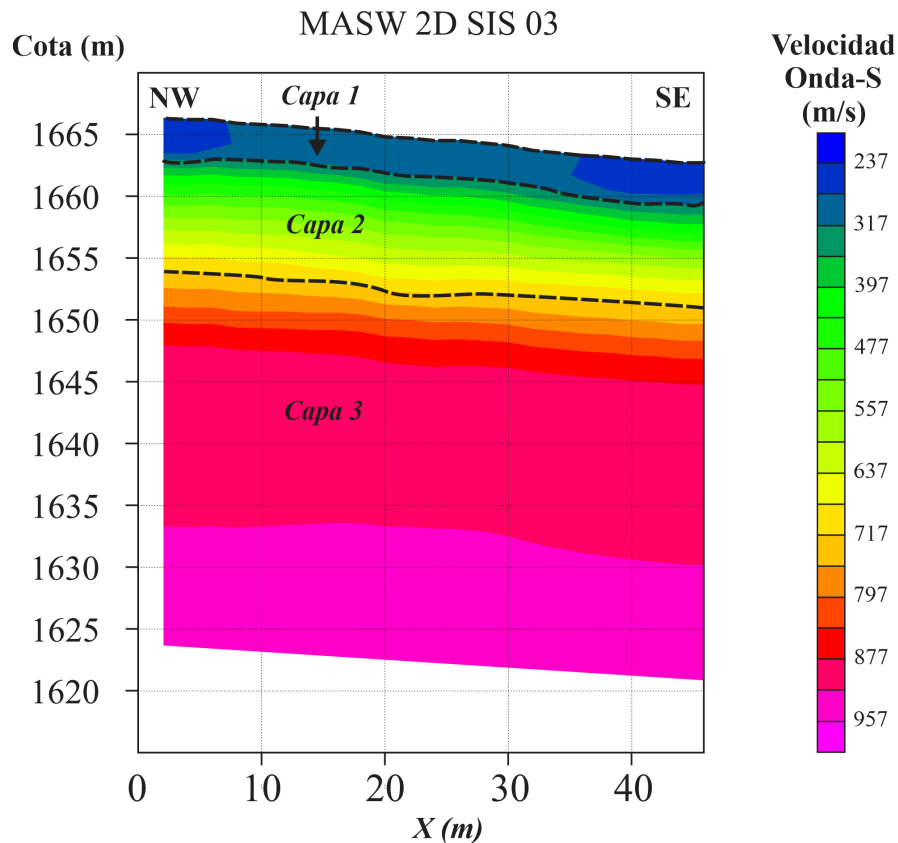
presenta velocidades V_s menores a 300 m/s . La segunda capa presenta un rango de velocidades entre $360 - 720 \text{ m/s}$ tiene un espesor de aproximadamente 7 metros; finalmente para la tercera capa se determinaron velocidades mayores a 770 m/s .

Figura 62

MASWID en el centro de la línea SIS 03



Nota. Modelo de Velocidad de Onda S obtenido por medio del método de MASW 1D para el perfil sísmico SIS03, obteniendo un V_{s30} de **688,1 m/s**.

Figura 63*MASW 2D SIS 03 interpretada*

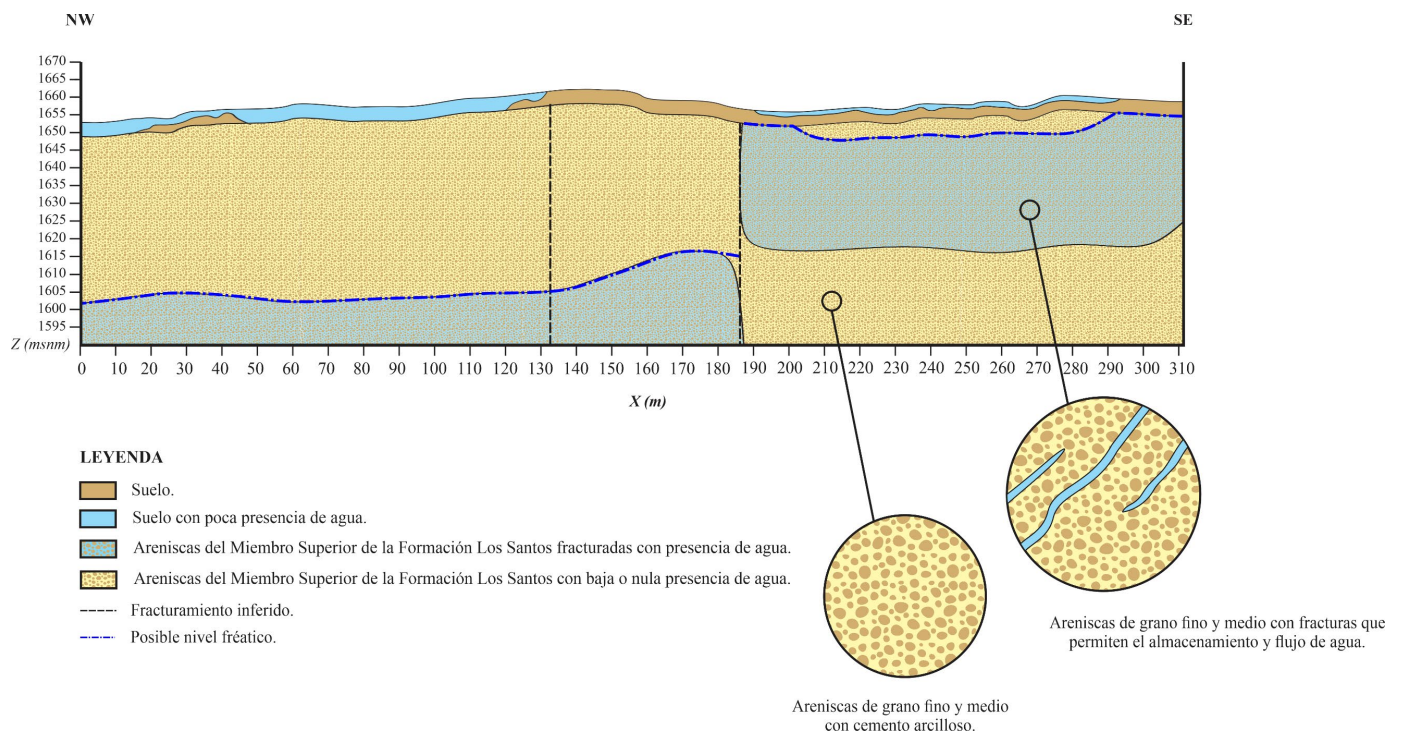
8.3 Interpretación geológica a partir de observaciones de campo y geofísica

La presencia de porosidad secundaria en el Miembro Superior de La Formación Los Santos está relacionada con la actividad tectónica local, el abundante fracturamiento que se observa en la zona es el principal factor que provoca la saturación y acumulación de agua. El presente estudio detectó un posible plano falla (asociado principalmente como plano de fracturamiento) que divide

dos zonas saturadas (Figura 64), lo que afecta la profundidad (variación lateral) del nivel freático en la zona.

Figura 64

Perfil geológico 01 obtenido con la relación de la Tomografía de Refracción Sísmica, MASW Y la TRE.

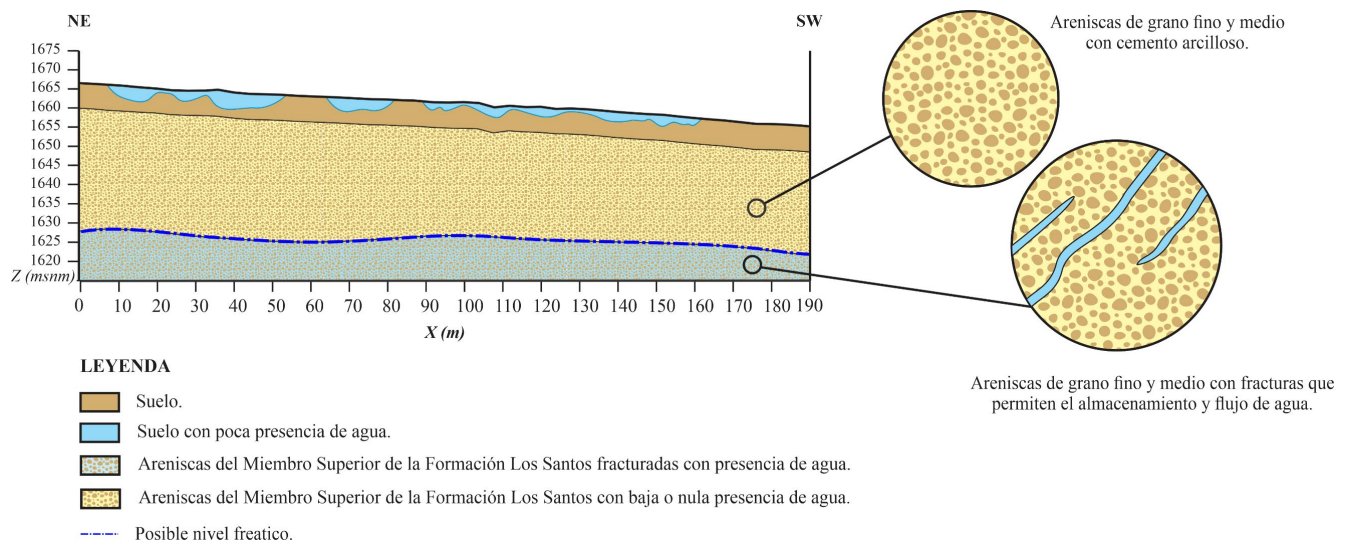


De acuerdo con los resultados obtenidos por los métodos de TRS y MASW, se ha identificado una capa superficial de unos 5 metros de espesor que se compone de material meteorizado del Miembro Superior de La Formación Los Santos. Una medición directa detectó presencia de agua a los 2,60 metros, no obstante, los modelos obtenidos mediante las TRE indican que esta capa no está completamente saturada (Figura 65), lo que sugiere que las acumulaciones

de agua discontinuas en la zona meteorizada podrían deberse a la infiltración de aguas lluvias, el valor obtenido en esta medición directa en el pozo corresponde al acuífero somero.

Figura 65

Perfil geológico 02 obtenido con la relación de la Tomografía de Refracción Sísmica, MASW Y la TRE.



Recopilando toda la información geológica y los datos obtenidos mediante los métodos geofísicos utilizados en este proyecto de investigación, se ha logrado identificar una variación lateral del nivel freático representativa, diferenciándolos en dos niveles. Se han logrado identificar dos sistemas acuíferos en el Miembro Superior de la Formación Los Santos, uno somero el cual corresponde a un acuífero libre discontinuo el cual se encuentra a una profundidad entre 5 y 10 metros, y otro superior a mayor profundidad el cual corresponde a un acuífero semiconfinado situado entre los 35 y 40 metros de profundidad. El primero es un nivel freático discontinuo que se encuentra a una profundidad de entre 5 y 10 metros, mientras que el segundo es un posible nivel piezométrico que se sitúa a unos 35-40 metros de profundidad, los cuales no evidencian una

conexión entre ellos considerando la profundidad de investigación alcanzada por los métodos geofísicos.

9. Conclusiones

De acuerdo con la información geológica recopilada de la zona de estudio se pudo comprobar que la Formación Los Santos presenta un alto potencial hidrogeológico, en particular asociado al Miembro Superior de dicha formación. Los valores de resistividad obtenidos mediante el procesamiento de las Tomografías de Resistividad Eléctrica coincidieron con los valores de resistividad que se han establecido en trabajos anteriores.

Los métodos geofísicos empleados permitieron determinar los contrastes de las propiedades físicas del subsuelo, en las Tomografías de Refracción Sísmica, se obtuvieron velocidades de onda P en el rango 300 m/s a 3092 m/s, mediante el procesamiento de MASW 2D se obtuvo velocidades en el rango de 237 m/s a 957 m/s para V_s , comprobando que $V_p > V_s$.

De acuerdo con la Norma Sismo Resistente NSR-10 se realizó la clasificación de los perfiles del suelo obtenido en la zona de estudio a partir de los valores de la onda de corte, se determinó que tanto la línea 1, 2 y 3 presentan perfil del suelo tipo C es decir suelos densos o roca blanda. Tomando en cuenta la Normativa Internacional para la ejecución del método de Refracción Sísmica ASTM D5777 se realizó la clasificación de las diferentes líneas estudiadas de acuerdo con el valor de onda P, para la línea 1 y la línea 2 se determinaron cuatro capas las cuales se componen de material superficial meteorizado, arena saturada, arenisca posiblemente húmeda y arenisca. Para la línea 3 se establecieron 3 capas donde la primera capa se compone de material superficial que ha sufrido meteorización, la segunda capa está compuesta de arena saturada, y la última capa se compone de arenisca que podría estar húmeda.

Los métodos geofísicos aplicados permitieron proponer una interpretación geológica de la zona de estudio donde obtuvieron dos modelos, el primer modelo alcanza profundidades de 60 metros donde se infirió un posible nivel freático localizado a una profundidad de entre los 5 y 10 metros y otro posible nivel freático a una profundidad de 30 y 45 metros, también se concluyó que las areniscas de la zona presentan porosidad y se presenta fracturamiento. El segundo modelo alcanzo una profundidad de aproximadamente 45 metros y el nivel freático se infirió a los 35 metros de profundidad.

10. Recomendaciones

Se sugiere llevar a cabo una nueva toma de datos durante la temporada seca, particularmente en el mes de enero, para determinar si hay cambios significativos en las zonas saturadas identificadas en la zona meteorizada. Esto se debe a que la toma de datos realizada para este estudio se llevó a cabo en julio y septiembre del año 2022, período durante el cual se registraron precipitaciones en la zona de estudio, lo que podría haber influenciado los resultados obtenidos.

Con el fin de obtener una caracterización más completa de la unidad acuífera del Miembro Superior de la Formación Los Santos, se recomienda realizar una perforación profunda de al menos 40 metros y proporcionar una descripción detallada tanto macroscópica como microscópica de las muestras obtenidas. Esto permitiría obtener información más precisa sobre la estratigrafía, la composición y la permeabilidad del acuífero, lo que resultaría útil para la gestión y explotación del recurso hídrico subterráneo.

Referencias Bibliográficas

- Al-Amoush, H., Rajab, J. A., Al-Tarazi, E., Al-Shabeeb, A. R., Al-Adamat, R., & Al-Fugara, A. (2017). Electrical Resistivity Tomography modeling of vertical lithological contact using different electrode configurations. *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences*, 8, 27, 34.
- Aldana, S. (2008). Estratigrafía de la Formación Los Santos en Las Secciones de la Navarra y el Calicho en la Mesa de Los Santos (Departamento de Santander). Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.
- Álvarez, M. (2015). Determinación de la amplificación sísmica local en el Campus Sur UPM mediante la técnica de sismología de microtemblores ReMi. Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Ingeniería Geomática y Topográfica, Universidad Politécnica de Madrid.
- Anomohanran, O. (2013). Geoelectrical investigation of groundwater condition in Oleh, Nigeria. *International Journal of Research Reviews in Applied Science*, 15, 145-151.
- Arias, D. (2011). Exploración geotécnica–Relaciones geoelectricas. Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Ingeniería Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia.
- ASTM International. (2011). ASTM D5777-11e1, "Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation". West Conshohocken, PA.
- Auge, M. (2008). Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea. Área de Hidrogeología. Departamento de Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Apuntes de cátedra.

- Avilés, J., & Barzallo, B. (2016). Caracterización de suelos del centro histórico de la ciudad de Cuenca mediante métodos geofísicos. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad de Cuenca.
- Becerra, N., Parra, C. (2016). Balance Hídrico para estimar la recarga potencial en La Mesa de Los Santos y dirección de flujo de agua subterránea. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander.
- Bran, J., Gonzáles, R., & Ortiz, H. (2009). Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de El Salvador. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad de El Salvador.
- Bromberg, S., & Rivaud, J. J. (2001). Fermat y el cálculo diferencial e integral. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Cantos, J. (1974). Tratado de geofísica aplicada. Litoprint, España, 197-371.
- Carrasco, A. (2020). *Geofísica Aplicada, Método Geoeléctrico*.
- Cediel, F. (1968). El grupo girón, una molasa mesozoica de la cordillera oriental. Boletín Geológico, 16(1-3), 5-96.
- Claerbout, J.F. and Muir, F., 1973. Robust modeling with erratic data. Geophysics, 38, 826-844.
- Coduto, D. P. (2011). Ingeniería geotécnica: principios y prácticas. 2da ed. Madrid: Pearson Educación.
- Contreras Vásquez, N. M. (2008). Análisis Del Fracturamiento Presente en la Formación Los Santos al Norte y Centro de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.

- Dal Moro, G. (2015). Surface wave analysis for near surface applications. Amsterdam: Elsevier Inc.
- Díaz, E. J., Contreras, N. M., Pinto, J. E., Velandia, F., Morales, C. J., y Hincapie, G. (2009). Evaluación Hidrogeológica Preliminar de Las Unidades Geológicas de la Mesa de Los Santos, Santander. Boletín Geológico, 31.
- Dobrin, M.B. y Savit, C.H. (1988). Introduction to Geophysical Prospecting (4th ed.). Nueva York: McGraw-Hill.
- EOT (2003). Esquema de Ordenamiento Territorial Los Santos Santander 2003: EOT Los Santos Santander 2003.
- Fetter, C. W. (1994). Applied hydrogeology. Prentice-Hall.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall.
- García, S. (2022). Análisis estructural de la Mesa de Los Santos y redes neuronales para la estimación local de las propiedades físicas de la roca. Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Geofísica, Universidad Industrial de Santander.
- García, S., & Gomez, E. (2015). Modelo conceptual hidrogeofísico para evaluar el potencial hidrogeológico de la formación los santos en la mesa de los santos – Santander, Colombia. Trabajo de grado para optar por el título de Geólogo, Universidad Industrial de Santander.
- Gardner, G.H.F., Gardner, L.W. and Gregory, A.R. (1974) Formation Velocity and Density—The Diagnostic Basics for Stratigraphic Traps. Geophysics, 39, 770-780.
- Giancoli, D. (2006). Física. Principios con aplicaciones (6 ed.). México D.F., México: Prentice Hall, Inc.

- Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E., & Cardenas, M. B. (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. In *Nature Geoscience* (Vol. 9, Issue 2, pp. 161–164). Nature Publishing Group.
- Gomez, C., Wandurraga, L., Molina, M., & Sarmiento, M. (2014). Análisis de la Situación Hidrogeológica de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander. Trabajo de grado para obtener el título de especialista en recursos hídricos, Universidad Católica de Colombia.
- Gómez, J., & Fernández, T. (2010). Evaluación de la peligrosidad sísmica en núcleos urbanos: la experiencia en Lorca. *Boletín Geológico y Minero*, 121(3), 277-288
- Hincapié, G., & Veloza, J. (2009). Recursos del subsuelo: informe hidrogeológico de la mesa de los santos. Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- IngeoExploraciones (2016). Elaboración y Formulación Del Plan de Manejo de Aguas Subterráneas en el Sector de la Mesa, Municipio de Los Santos. Fase III. Technical report, IngeoExploraciones S.A.S., Bucaramanga.
- Julivert, M. (1958). La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, 1, 7–43.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Lazcano, S. (2007). Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie. Academia de Ingeniería de México.

- Liu, C. W., & Ouazar, D. (2003). Modeling the transport of solutes in fractured media: a review. *Journal of Contaminant Hydrology*, 64(3-4), 203-224.
- Llinares Galiana, J., Llopis Reyna, A., Vendrell, S., & Javier, F. (1996). *Acústica arquitectónica y urbanística*. Valencia, España: Editorial Universitat Politècnica de València.
- Loke, M. H. (2004). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*.
- López, J. M., Mejía, J. A., & Vega, N. (2008). *Aplicación del Método de Refracción Sísmica Para la Determinación de Velocidades de Ondas P*. Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad de El Salvador.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentos de Geofísica*. Prensa de la Universidad de Cambridge.
- Maggi, A. y Priestley, K. (2005). Ondas sísmicas. En *Enciclopedia de geología* (Vol. 2, págs. 363-370). Elsevier.
- Matthews, M. C., Hope, V. S., & Clayton, C. R. (1996). The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles. London: Proc. Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering.
- MAVDT. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Ley 400 de 1997 (modificada por la Ley 1229 de 2008 y el Decreto 019 de 2012). Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Molina Calvo, A. (2018). *Exploración arqueológica por tomografía eléctrica: Aplicación al yacimiento arqueológico de Huerta Montero (Almendralejo, Badajoz)*. Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Geomático y Topografía, Universidad de Extremadura.

- Morales, C., Forero, H., Rojas, N., & Alvarado, S. (2010). Integración geológica e hidrogeológica del centro de Santander.
- Morales, L. (1958). General geology and oil occurrences of middle Magdalena Valley, Colombia. Habitat of Oil.
- Moyano, I. (2010). Prospección Geoeléctrica en La Mesa de Los Santos (Santander). Procesamiento e Interpretación de Sondeos Eléctricos verticales. Technical report, Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- Muñoz, MC (2021). Tomografía eléctrica: Fundamentos y aplicaciones.
- Neuman, S. P. (1972). Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, 8(4), 1031-1045.
- Park, C., Miller, R. y Xía, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*. Vol. 64. N° 3. p: 800-808.
- Pinto, J., Clavijo, J., Morales, C., Velandia, F., Hincapié, G., & Forero, H. (2007). Proyecto de investigación geológica e hidrogeología en la Mesa de Los Santos, sector noreste de Curití y borde occidental del Macizo de Santander, departamento de Santander: Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos y sector nordeste de Curití. (INGEOMINAS & UIS, Eds.). INGEOMINAS.
- Rivera Zeta, M. A., Rubio, R. P., & García, Y. P. (2016). Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones.

Royero, J., & Clavijo, J. (2001). Memoria explicativa del mapa geológico generalizado del departamento de Santander, escala 1:400.000. INGEOMINAS.

Sánchez San Román. (2017). Hidrología superficial y subterránea. F. Javier Sánchez San Román.

Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu, K. (1986) Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112, 1016-1032.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2009). Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna (Séptima ed., Vols. II). Mexico, D.F.: Cengage Learning Editores.

Singhal, BBS y Gupta, RP (2010). Hidrogeología aplicada de rocas fracturadas. Springer Science & Business Media.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). Applied geophysics. Cambridge University Press

Todd, D. K. (1980). Groundwater hydrology. Wiley.

UNESCO. (2022). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022.

United Nations Environment Programme (PNUMA), & Comunidad Andina (2003). Perspectivas del Medio Ambiente Urbano - GEO Andino.

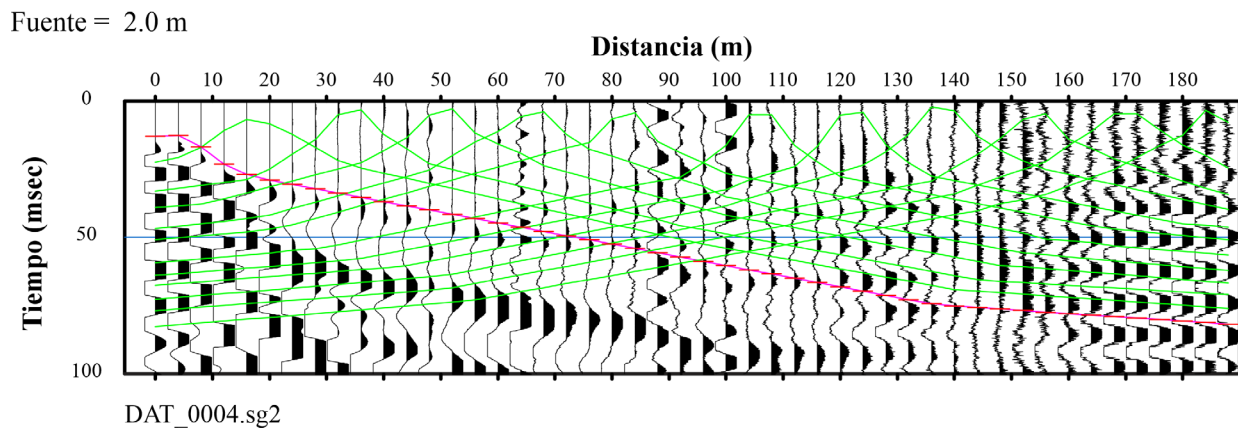
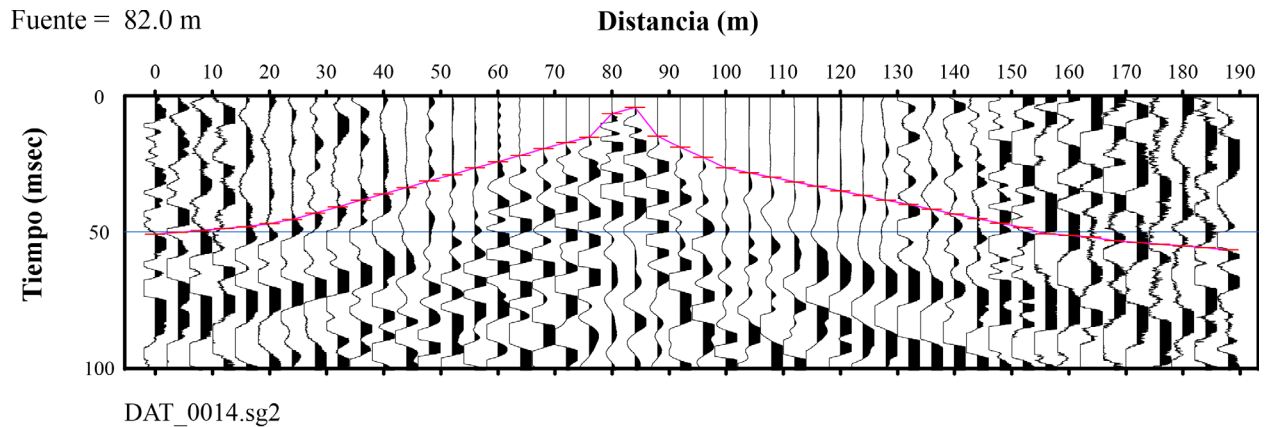
Vargas Huitzil, E. (2015). Tomografía eléctrica aplicada a caracterizar la cantera La Joya ubicada en el municipio de Ixtacuixtla, Tlaxcala. Trabajo de grado para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería Geofísica, Universidad Autónoma de Puebla.

- Vargas, C. (2008). Cartografía geológica a escala 1:25.000 de la Mesa de los Santos, departamento de Santander. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.
- Velandia, F.; Bermúdez, M. (2018). The transpressive southern termination of the Bucaramanga fault (Colombia): insights from geological mapping, stress tensors, and fractal analysis. *Journal of Structural Geology*, 115, 190-207.
- Velandia, F.; García-Delgado, H.; Zuluaga, C.A.; López, J.A.; Bermúdez, M.A.; Audemard, F.A. (2020). Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Northern Andes. *Journal of Structural Geology*, 137.
- Vélez Otálvaro, M. V., Ortiz Pimienta, C., & Vargas Quintero, M. C. (Eds.). (2011). *Las aguas subterráneas. Un enfoque práctico*. Libros del Servicio Geológico Colombiano
- Villamizar, J. D. (2011). Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: estado del arte. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander.
- Ward, S. H. (1990). Resistivity and Induced Polarization Methods. In: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. *Society of Exploration Geophysicists, I: Review*, 147–190.
- Woods, R. D. (1968). Screening of surface waves in soils.

ANEXOS

Anexo 1

Picado de los primeros arribos de las ondas refractadas críticamente

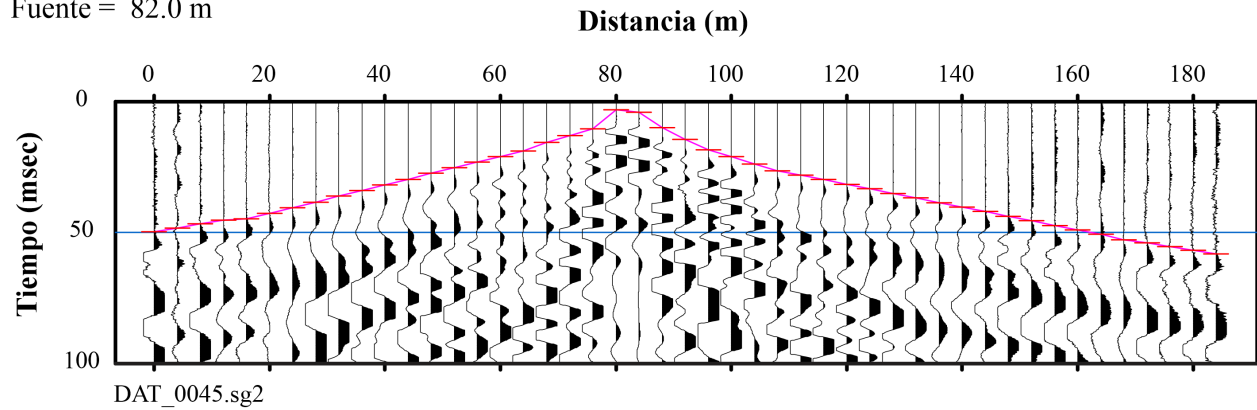


Nota. Los segmentos de la línea en color rojo y las líneas verdes representan las primeras llegadas de las ondas refractadas para el perfil sísmico SIS 01.

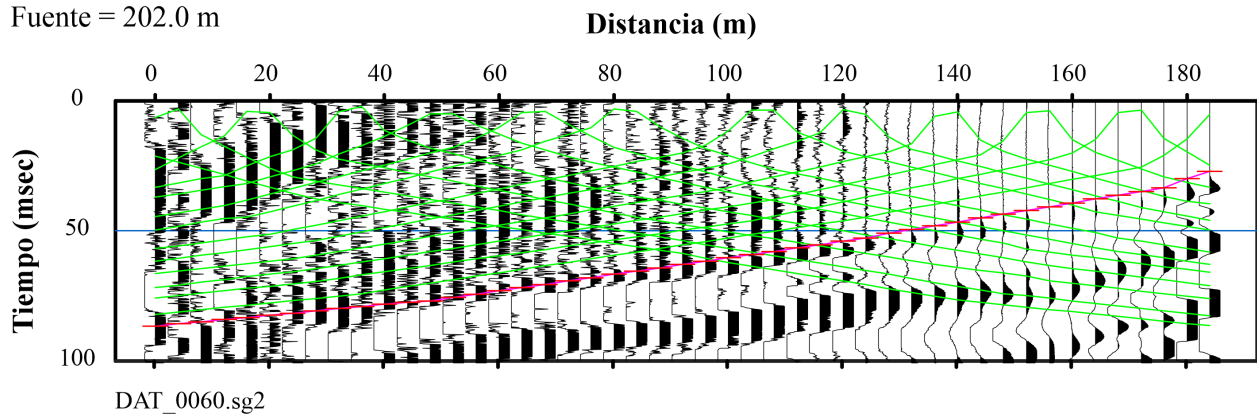
Anexo 2

Picado de los primeros arribos de las ondas refractadas críticamente

Fuente = 82.0 m



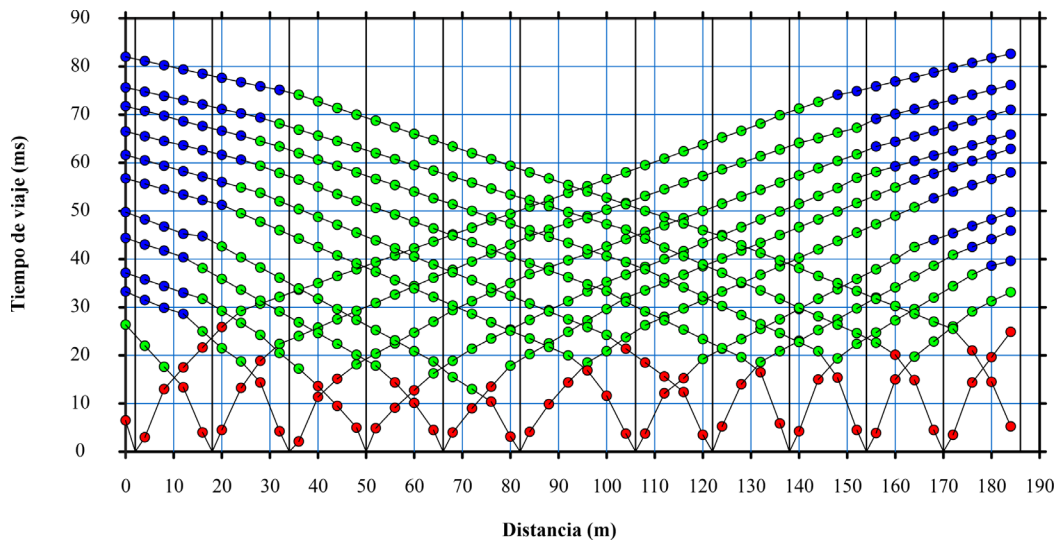
Fuente = 202.0 m



Nota. Los segmentos de la línea en color rojo y las líneas verdes representan las primeras llegadas de las ondas refractadas para el perfil sísmico SIS 02.

Anexo 3

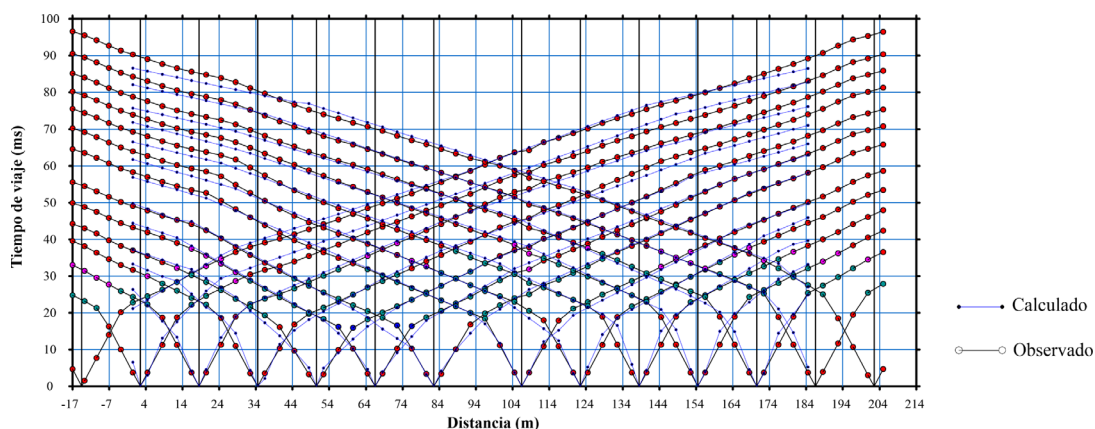
Picado de los primeros arribos de las ondas refractadas críticamente



Nota. Representación para 12 coordenadas de disparo, los círculos en color rojo, verde y azul representan la asignación de capas en los diferentes cambios de pendiente observados en la SIS02.

Anexo 4

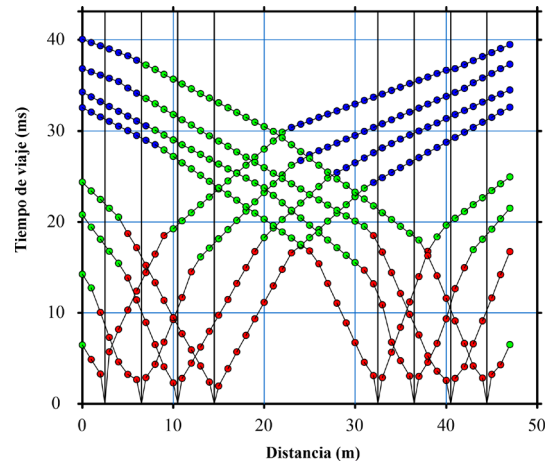
Dromocronas observadas y calculadas



Nota. Dromocronas observadas y calculadas en la SIS02.

Anexo 5

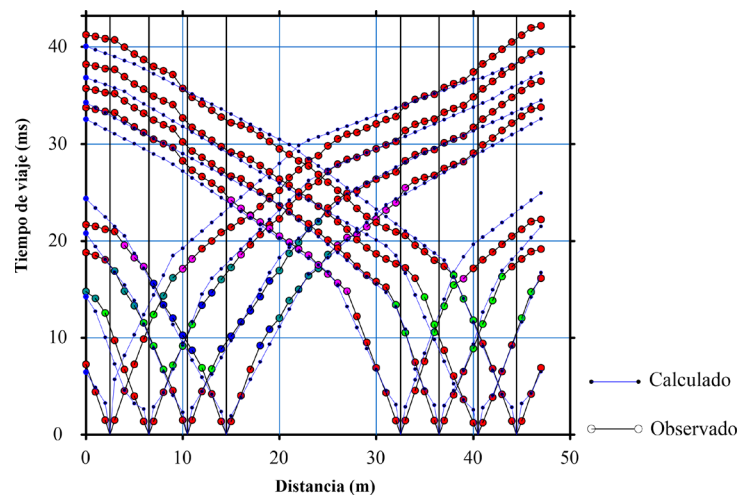
Picado de los primeros arribos de las ondas refractadas críticamente



Nota. Representación para 12 coordenadas de disparo, los círculos en color rojo, verde y azul representan la asignación de capas en los diferentes cambios de pendiente observados en la **SIS03**.

Anexo 6

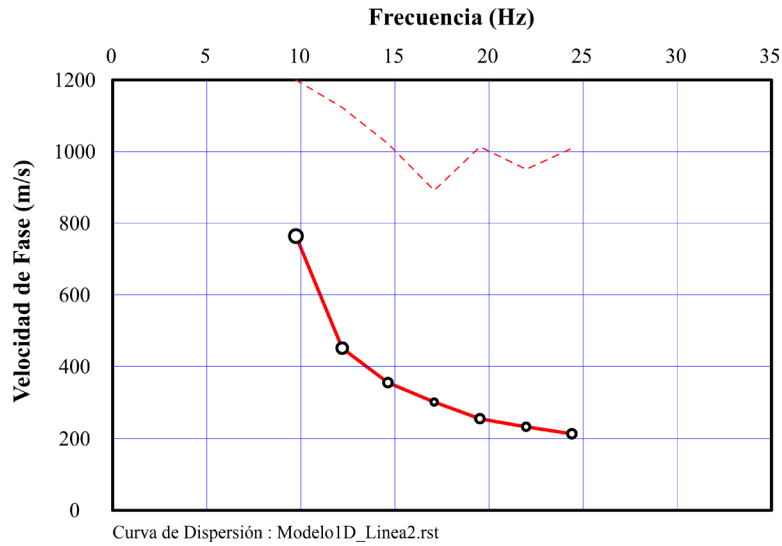
Dromocronas observadas y calculadas



Nota. Dromocronas observadas y calculadas en la **SIS02**.

Anexo 7

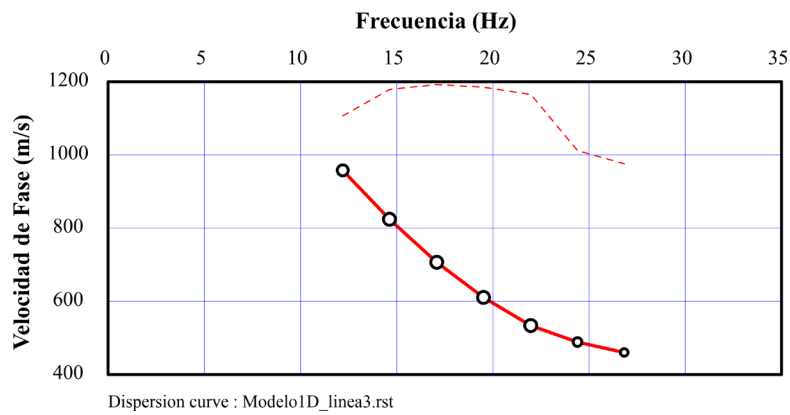
Curva de dispersión para el modo fundamental.



Nota. Curva de dispersión para el modo fundamental en un perfil 1D de la SIS 02.

Anexo 8

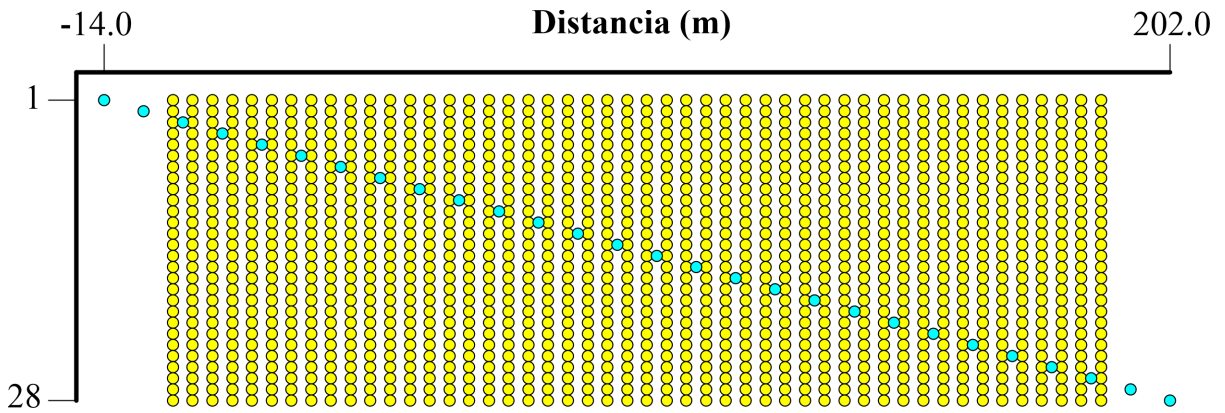
Curva de dispersión para el modo fundamental.



Nota. Curva de dispersión para el modo fundamental en un perfil 1D de la SIS 03.

Anexo 9

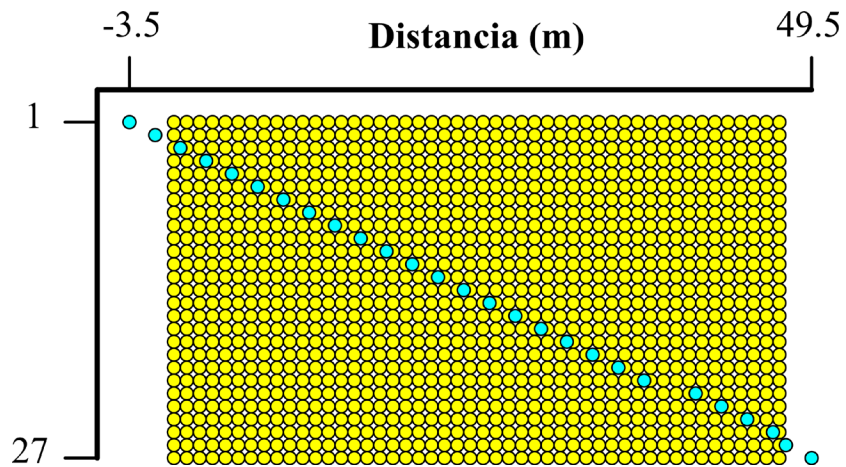
Procesamiento MASW2D Punto Medio Común



Nota. Procesamiento MASW2D Punto Medio Común para la SIS01 y SIS02.

Anexo 10

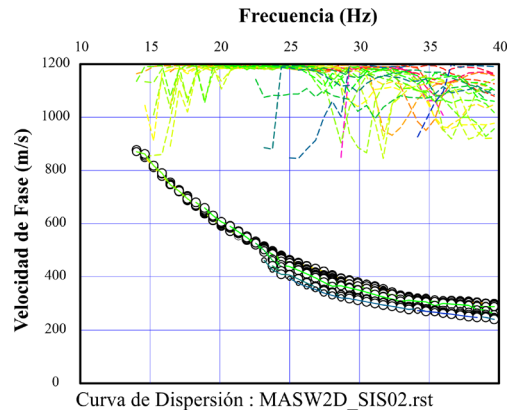
Procesamiento MASW2D Punto Medio Común



Nota. Procesamiento MASW2D Punto Medio Común para la SIS 01 y 02.

Anexo 11

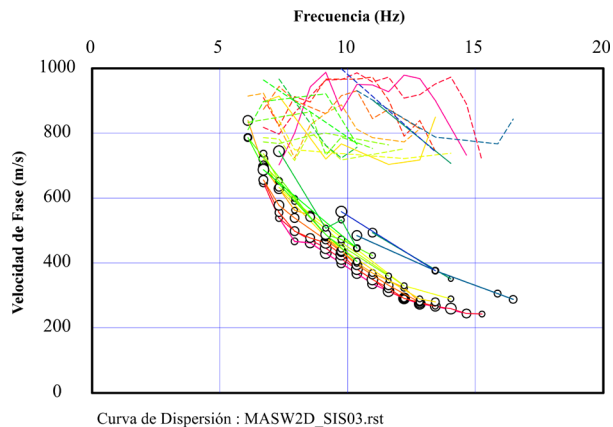
Curva de dispersión para el modo fundamental



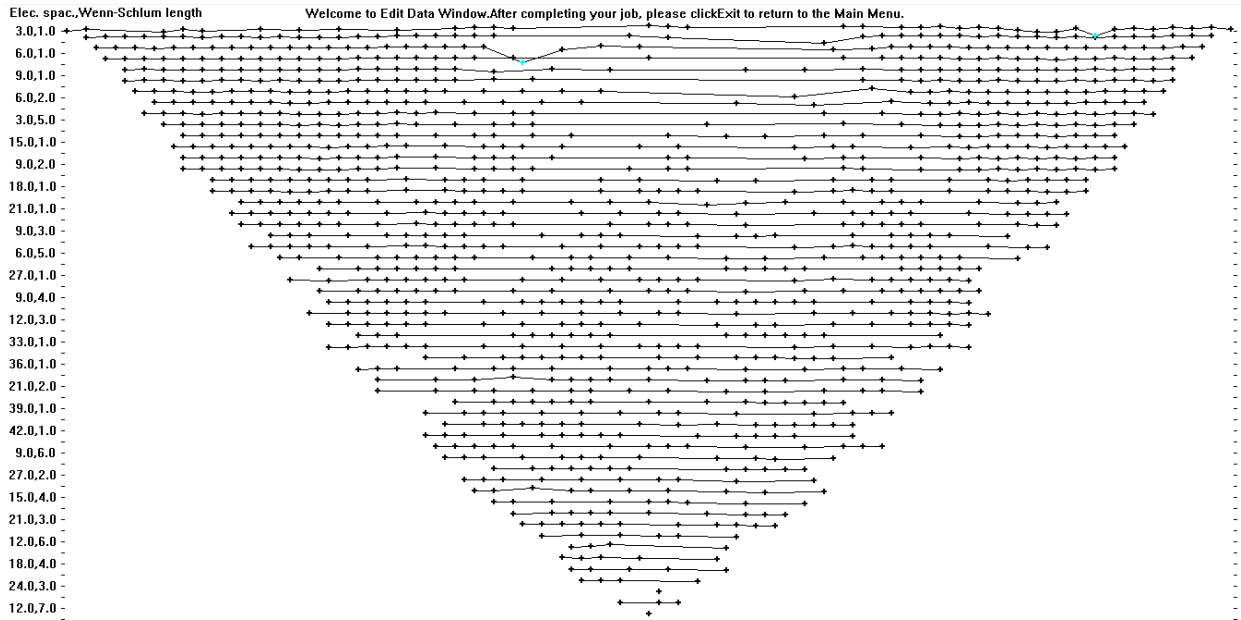
Nota. Se presentan las curvas de dispersión correspondientes al modo fundamental y la relación señal-ruido (representada por líneas discontinuas) de los datos obtenidos en la SIS02.

Anexo 12

Curva de dispersión para el modo fundamental



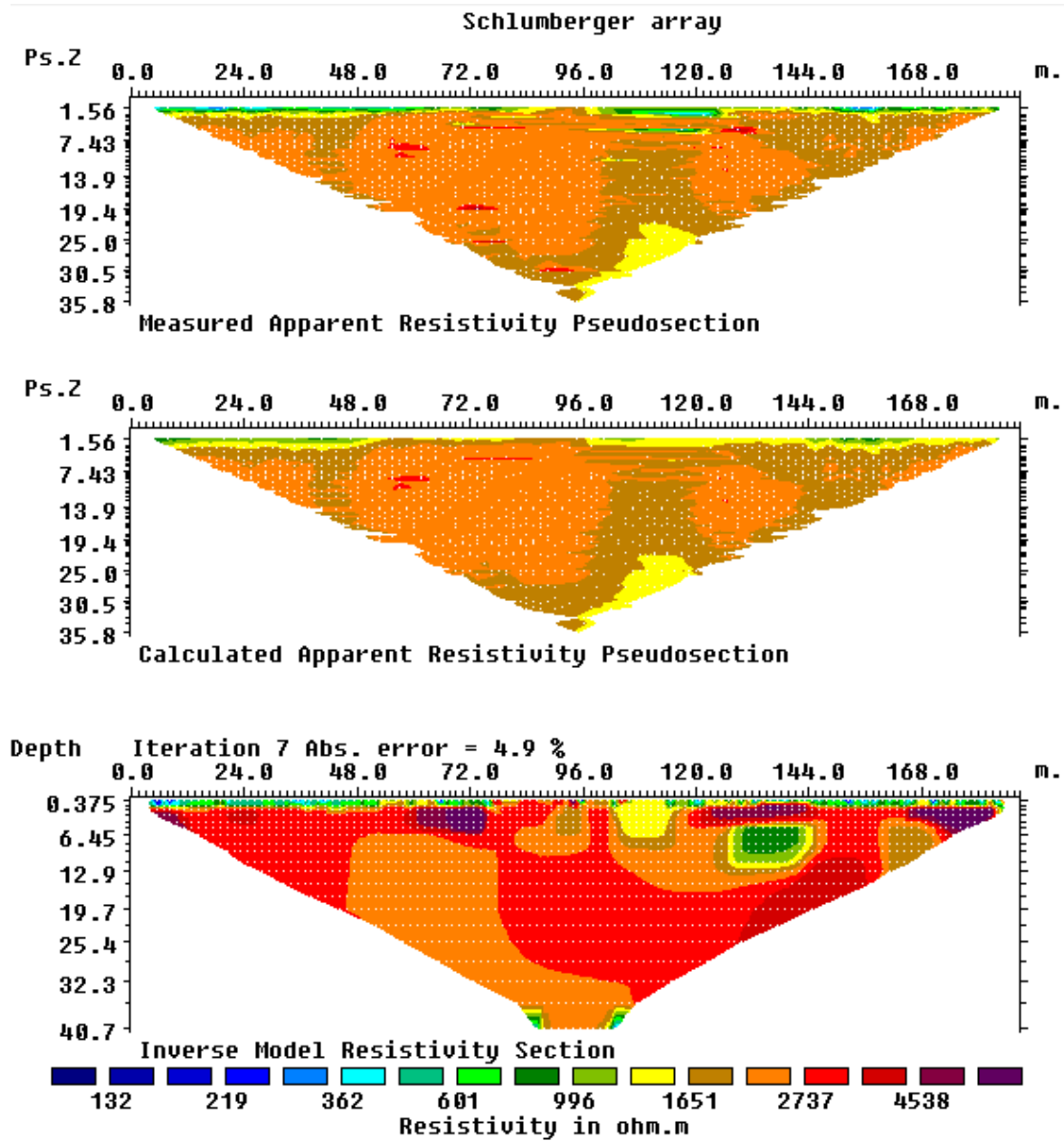
Nota. Se presentan las curvas de dispersión correspondientes al modo fundamental y la relación señal-ruido (representada por líneas discontinuas) de los datos obtenidos en la SIS03.

Anexo 13*Análisis de datos anómalos "Bad Data Points"*

Nota. Los puntos seleccionados se eliminaron del procesamiento de los datos. Ejemplo para la TRE 02 con el arreglo Schlumberger.

Anexo 14

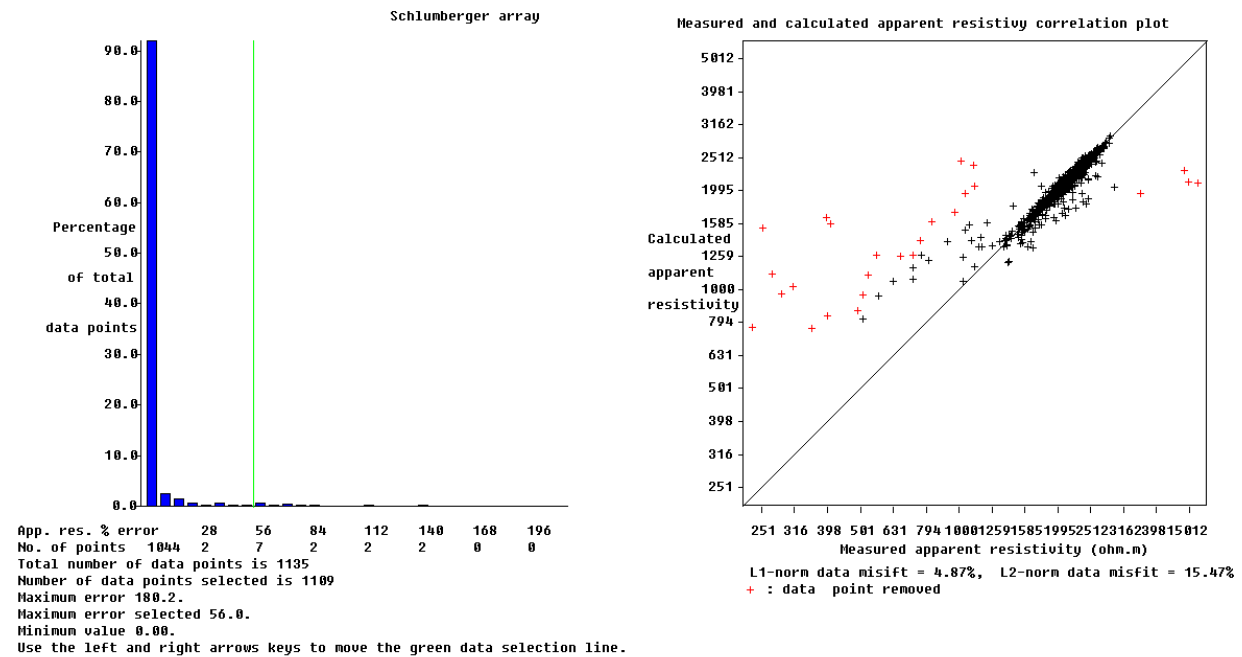
TRE inversión preliminar



Nota. Primera inversión de los datos de la TRE 02 con arreglo Schlumberger para observar el comportamiento del modelo resuelto considerando los datos adquiridos.

Anexo 15

Valores del Error Root Mean Square (RMS) para el modelo generado.



Nota. Análisis y filtrado de los resultados obtenidos considerando el error RMS entre los valores medidos en campo de la TRE02 y los calculados en el proceso de inversión con arreglo Schlumberger.