

**Caracterización geotécnica del sitio de disposición final de residuos “el carrasco” sector “la
escombrera” mediante el uso de métodos geofísicos**

Nelson Andrés Pérez Navas

Astolfi Rojas Delgado

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Hebenly Celis Leguizamo

MSc. en Ingeniería Civil

Alvaro Viviescas Jaimes

PhD. en Ingeniería de la Construcción

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Civil

Bucaramanga

2019

A la Ingeniera Hebenly Celis y al Ingeniero Álvaro Viviescas, por su labor y dedicación como directora y codirector de este proyecto, por su acompañamiento y guía al momento de su realización, ya que sin su apoyo no habría sido posible su culminación con éxito.

Al Ingeniero Jorge Mendoza, por toda su ayuda al momento de realizar este documento, por sus aportes y contribuciones para que este proyecto resultara de la mejor manera.

A mis padres, por apoyarme a lo largo de mi carrera universitaria, por toda su entrega y sacrificio día a día para poder llegar hasta aquí y que esto se hiciera posible. Este logro es totalmente para ellos.

A mis amigos y los compañeros que tuve a lo largo de toda mi carrera, que me ayudaron a llegar hasta este punto y con los cuáles viví gratos momentos.

ANDRÉS PÉREZ NAVAS

*Toda la gloria sea para Dios, por guiarme en cada decisión y por
todas las bendiciones recibidas.*

*A mis padres, por su dedicación y sacrificio, ellos han sido el pilar
fundamental de mi formación llena de valores y principios, gracias
a ellos cumplo una meta más y prometo retribuirles cada acto de
amor.*

*A mi hermano, por la paciencia y la compañía, gracias por
ayudarme a crecer.*

*A mi compañera de vida, por no permitirme desfallecer y
ayudarme a encontrar las respuestas. Gracias por apostar todo,
creer en mí y compartir la vida conmigo.*

*A mi segundo hogar, por abrirme las puertas y acogerme como un
hijo más, apoyándose en cada paso, en especial a Doña Gladys,
de quien he aprendido demasiado.*

*A mis docentes directores Hebenly Celis, Álvaro Viviescas y Jorge
Mendoza, quienes estuvieron presentes en todo el desarrollo del
proyecto, que compartieron su tiempo y conocimiento y nos
brindaron las herramientas necesarias para culminar el proyecto
de la mejor forma.*

ASTOLFI ROJAS DELGADO

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Generalidades.....	18
1.1 Ubicación geográfica del relleno Sanitario.....	18
1.2 Topografía general del relleno sanitario.	19
1.3 Ubicación zona de estudio.	19
1.4 Topografía zona de estudio.	20
1.5 Tipos de residuos y forma de relleno.	22
1.5.1 Tipos de residuos.	22
1.5.2 Forma de relleno.	23
1.6 Prospección Geofísica.....	25
1.6.1 Método Sísmico.	25
1.6.1.1 MASW.	25
1.6.1.2 Refracción sísmica.	26
1.6.1.3 ReMi (Refraction Microtremors).....	26
1.6.2 Tomografía Eléctrica.	27
2. Metodología	27
2.1. Ensayo de refracción sísmica.....	27
2.2. Ensayo de MASW.....	29

2.3. Ensayo Re-Mi	31
2.4. Ensayo de tomografía eléctrica.....	32
3. Resultados.....	33
3.1 Refracción sísmica.....	33
3.2. MASW	36
3.2.1. Resultados MASW (Análisis 2D).....	36
3.2.3. Resultados MASW (Análisis 1D).....	38
3.3.Obtencion perfil estratigrafico	45
3.4. ReMi (Refraction Microtremors).....	45
3.5. Tomografía Eléctrica	46
4. Conclusiones	50
5. Recomendaciones	51
Referencias Bibliográficas	52

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Imagen Satelital “El Carrasco”.	18
<i>Figura 2.</i> Plano geo-referenciado “El Carrasco”.	19
<i>Figura 3.</i> Foto Satelital “La Escombrera”.	20
<i>Figura 4.</i> Topografía zona “La Escombrera”	21
<i>Figura 5.</i> Pendientes de la zona “La Escombrera”.	21
<i>Figura 6.</i> Fotografía de residuos presentes en la “Escombrera” (Entrada).	22
<i>Figura 7.</i> Fotografía de residuos presentes en la “Escombrera” (Botadero).	22
<i>Figura 8.</i> Fotografía de residuos presentes en la “Escombrera” (Talud).	23
<i>Figura 9.</i> Talud principal de “La Escombrera”.	23
<i>Figura 10.</i> Formación de terrazas al momento de compactar residuos en campo.	24
<i>Figura 11.</i> Formación de terrazas al momento de compactar residuos en campo.	24
<i>Figura 12.</i> Probable perfil obtenido a partir de la forma del relleno.	24
<i>Figura 13.</i> Ubicación de las líneas de Refracción Sísmica.	28
<i>Figura 14.</i> Geófonos azules de 14 [Hz].	29
<i>Figura 15.</i> Ubicación de las líneas del ensayo MASW.	30
<i>Figura 16.</i> Geófonos rojos de 4.5 [Hz].	30
<i>Figura 17.</i> Ubicación de la línea del ensayo Re-Mi.	31
<i>Figura 18.</i> Montaje de la línea de tomografía eléctrica.	32

<i>Figura 19.</i> Modelo final de velocidades de onda P para la línea de 1[m].	34
<i>Figura 20.</i> Modelo final de velocidades de onda P para la línea de 2[m].	34
<i>Figura 21.</i> Modelo final de velocidades de onda P para la línea de 3[m].	35
<i>Figura 22.</i> Perfil Vs vs. Profundidad (Línea 1[m]).	37
<i>Figura 23.</i> Perfil Vs vs. Profundidad (Línea 2[m]).	37
<i>Figura 24.</i> Perfil Vs vs. Profundidad (Línea 3[m]).	38
<i>Figura 25.</i> Las líneas de colores representan el comportamiento de Vs y G vs. Profundidad para la línea de 1[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.	39
<i>Figura 26.</i> Las líneas de colores representan el comportamiento de N y ϕ vs. Profundidad para la línea de 1[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.	40
<i>Figura 27.</i> Las líneas de colores representan el comportamiento de Vs, G vs. Profundidad para la línea de 2[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.	41
<i>Figura 28.</i> Las líneas de colores representan el comportamiento de N y ϕ vs. Profundidad para la línea de 2[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.	42
<i>Figura 29.</i> Las líneas de colores representan el comportamiento de Vs, G vs. Profundidad para la línea de 3[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.	43

<i>Figura 30.</i> Las líneas de colores representan el comportamiento de N y ϕ vs. Profundidad para la línea de 2[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.	44
<i>Figura 31.</i> Caracterización de materiales según la velocidad de onda longitudinal.	45
<i>Figura 32.</i> Comportamiento de Vs, G y N vs. Profundidad para el ensayo Re-Mi.....	46
<i>Figura 33.</i> Perfil de resistividades del suelo (superficie plana).....	47
<i>Figura 34.</i> Perfil de resistividades del suelo con altimetría.....	47
<i>Figura 35.</i> Rango de resistividades para diferentes elementos del subsuelo.....	48

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Valores aproximados de V_p obtenidos en el ensayo de Refracción Sísmica para cada estrato.</i>	35
Tabla 2. <i>Valores promedio para espesores propuestos en orden descendente para la línea de 1[m]</i>	40
Tabla 3. <i>Valores promedio para espesores propuestos en orden descendente para la línea de 2[m]</i>	42
Tabla 4. <i>Valores promedio para los espesores propuestos en orden descendente para la línea de 3[m]</i>	44
Tabla 5. <i>Perfil propuesto para “La Escombrera” a partir de los resultados obtenidos en ensayos sísmicos y tomografía eléctrica.</i>	49

Lista de Apéndices

Ver documentos adjuntos en el CD-ROM y pueden ser visualizados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Imágenes complementarias de la sección de generalidades.

Apéndice B. Montaje de la línea sísmica.

Apéndice C. Procesamiento de datos MASW 1D, Re-Mi, MASW 2D y Refracción sísmica utilizando el software SeisImager/SW.

Apéndice D. Resultados del procesamiento de datos MASW 1D, MASW 2D Y Refracción sísmica

Apéndice E. Correlaciones usadas para determinar parámetros dinámicos y propiedades del suelo.

Resumen

TITULO: Caracterización geotécnica del sitio de disposición final de residuos “el carrasco” sector “la escombrera” mediante el uso de métodos geofísicos.*

AUTORES: Nelson Andrés Pérez Navas
Astolfi Rojas Delgado**

PALABRAS CLAVE: Geotecnia, Geofísica, Sísmica, Tomografía eléctrica, Relleno Sanitario.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo se realizó para obtener datos e información del subsuelo en la zona conocida como “La Escombrera” ubicada en el relleno sanitario del área metropolitana de Bucaramanga y sus alrededores mejor conocido como “El Carrasco”, haciendo uso de técnicas geofísicas como MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) , MAM (Microtrepidaciones en Arreglo Multicanal) más conocido como Re-Mi (Refraction Microtremors), Refracción Sísmica y Tomografía eléctrica lo cual permitió determinar un perfil estratigráfico aproximado con sus parámetros dinámicos y sus posibles espesores, además de esto, se logró determinar la presencia de agua y las posibles causas de estas concentraciones, teniendo en cuenta las propiedades del suelo y su topografía. Estos ensayos se realizaron como resultados preliminares para determinar el aprovechamiento de esta zona en un proyecto de energía fotovoltaica, abriendo la puerta para futuras investigaciones sobre el comportamiento del suelo, respecto a su capacidad portante, sus asentamientos y sus deformaciones, a largo y a corto plazo. Este proyecto, deje en evidencia como la utilización de métodos geofísicos en los estudios de suelos, representan una alternativa efectiva a la hora de caracterizar una zona, estos métodos al ser complementados con ensayos tradicionales de laboratorio y campo, pueden realizar una caracterización completa y segura del suelo.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Civil. Director

Abstract

TITLE: Geotechnical characterization of the final waste disposal site "el carrasco" sector "the dump" through the use of geophysical methods *

AUTORES: Nelson Andrés Pérez Navas
Astolfi Rojas Delgado **

KEYWORDS: Geotechnical, Geophysics, Seismic Methods, Electric Tomography, Soils, Landfill.

DESCRIPTION

This work was made to obtain all the possible information about the soil of the area known as “La Escombrera” located in the landfill of the metropolitan area of Bucaramanga and its surroundings better known as “El Carrasco”, using geophysical techniques such as MASW (Multichannel Analyzes of Surface Waves), MAM (Micro-trepidations in Multichannel Arrangement), better known as Re-Mi (Refraction Micro-tremors), Seismic Refraction and electrical tomography, thanks to this methods it was possible to obtain an stratigraphic profile of the subsoil, also, it was possible to determine its dynamic parameters and its approximate thicknesses, on the other hand, it could be detected the presence of water and its most likely causes based on the soil properties and the topography of the zone. These tests were carried out as preliminary results to determine the use of this area in a photovoltaic energy project, opening the door for future research on soil behavior, regarding its bearing capacity, its settlements and its deformations, in the long and short term. This project, show how the use of geophysical methods in soil studies, represent an effective alternative when characterizing an area, these methods, being complemented with traditional laboratory and field tests, can perform a complete and safe characterization of a determinate soil.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecanicas Escuela de Ingenierías Civil. Director

Introducción

Los rellenos sanitarios son una parte importante en la infraestructura de una ciudad ya que se encargan del manejo de los residuos sólidos, esta alternativa de disposición final se convierte en una forma eficaz y segura de tratamiento siempre y cuando su construcción y mantenimiento se hayan llevado a cabo de manera correcta. Sin embargo, uno de los aspectos más notables al hablar de rellenos sanitarios es la utilización de extensas áreas de tierra que además deben estar aisladas de los núcleos urbanos debido a las afectaciones que pueden generar a la comunidad de su entorno, como los malos olores, la contaminación de acuíferos, etc. Por lo tanto, cuando el sitio de disposición final cumple su ciclo de vida útil, es importante pensar en el aprovechamiento de estas extensas zonas de tierra.

Por esta razón, se evidencia la tendencia internacional de aprovechar estas áreas clausuradas y reincorporar estos suelos para su aprovechamiento en el desarrollo de proyectos de energía a partir de fuentes renovables. (Tansel, Varala, & Londono, 2013) (Sampson, 2009) (Clover, 2017)

Teniendo en cuenta que en Bucaramanga el relleno sanitario “El Carrasco”, actualmente está en proceso de clausura (Arias & Pineda, 2017) (Chio, 2017), se propone evaluar su viabilidad para el beneficio en la instalación de un parque solar fotovoltaico, aprovechando la privilegiada ubicación geográfica de Bucaramanga en cuánto a este recurso renovable, para lo cual es indispensable realizar la caracterización geotécnica de los potenciales sitios.

Para la caracterización geotécnica preliminar se determina realizar prospección geofísica de tipo “No destructivo” en algunas zonas del relleno próximas a su clausura. Se seleccionaron este

tipo de ensayos porque representan una alternativa eficiente y menos costosa en comparación con los métodos tradicionales para caracterizar una zona, de esta forma se pueden obtener una cantidad aceptable de información geotécnica.

La selección de los métodos geofísicos se determinó teniendo en cuenta las ventajas que estos métodos brindan, como la rapidez y economía a la hora de realizar una exploración preliminar de un suelo, los métodos seleccionados fueron las técnicas MASW (Multichannel Analysis Surface Waves), Refracción sísmica, MAM (Microtremors Array Measurements) comúnmente conocido como Re-Mi (Refraction Microtremors) y Tomografía eléctrica.

Los ensayos de prospección sísmica permiten obtener un perfil estratigráfico por medio de la propagación de ondas a través del suelo de estudio, obteniendo las velocidades de estas ondas a distintas profundidades y el tiempo en el que se propagan al reaccionar a una fuente activa. La aplicación de estas técnicas permite determinar los factores mecánicos y dinámicos del suelo utilizando correlaciones que involucran la velocidad de la onda, la densidad del suelo y el número N, que se refiere al número de golpes del ensayo SPT de campo, las cuáles logran proporcionar un perfil estratigráfico aproximado con los estratos del subsuelo y sus espesores.

Es necesario también, conocer el estado de saturación del suelo, la presencia de filtraciones y sus posibles niveles freáticos, lo cual se hace posible por medio del ensayo de tomografía eléctrica. El objetivo de este ensayo es obtener un modelamiento 2D de las resistividades del suelo mediante el registro de los cambios anómalos de los valores de resistividad del terreno que permitan determinar de manera clara las características mencionadas anteriormente, complementando así los resultados obtenidos en el ensayo de refracción y obteniendo información necesaria del suelo para determinar su capacidad portante y su resistencia.

1. Generalidades

1.1 Ubicación geográfica del relleno Sanitario

El relleno sanitario “El Carrasco” se encuentra ubicado en el departamento de Santander (Colombia), en el kilómetro 6 de la vía que conduce de Bucaramanga a Girón al suroccidente de la ciudad en una cañada natural dentro de los depósitos aluviales de la meseta de Bucaramanga en la zona central del Distrito de Manejo Integrado (DMI) de Bucaramanga, en una porción sustraída de dicho distrito sobre el sector conocido como Malpaso. El terreno tiene una extensión de 93.2 hectáreas divididas en tres zonas o cárcavas naturales (Prado Llanes, 2014). (Ver figura 1)



Figura 1. Imagen Satelital “El Carrasco”. Tomado de: Google Earth Pro.

Para ver la imagen con mayor detalle dirigirse al Apéndice A

1.2 Topografía general del relleno sanitario.

Se pudieron obtener los planos topográficos del sitio de disposición final “El Carrasco” que contribuyeron a realizar un análisis *a priori* de las características superficiales del terreno de esta zona por medio de la observación de la evolución de las cotas de nivel en los diferentes sitios de interés del relleno sanitario. De esta inspección preliminar se encontraron dos posibles áreas, la “Antigua Celda I” y “La Escombrera” que fueron catalogadas como potenciales para la realización de estos ensayos, debido a sus extensas áreas. (Ver figura 2)



Figura 2. Plano geo-referenciado “El Carrasco”. Tomado de: Empresa Metropolitana Aseo de Bucaramanga EMAB.

Para ver las imagen con mayor detalle dirigirse al Apéndice A.

1.3 Ubicación zona de estudio.

Una vez analizadas las zonas del relleno sanitario, se determinaron potenciales zonas para un proyecto de energía solar. Posteriormente se visitó el relleno sanitario y con el concepto de la entidad encargada de la operación del relleno se definió una zona para realizar el estudio

geotécnico, esta zona es conocida como “La Escombrera” (figura 3), este sector del relleno sanitario está ubicado en el costado Nor-Oriental del relleno sanitario, colinda con el muro divisorio y es el sector más próximo al barrio “El Porvenir”.



Figura 3. Foto Satelital “La Escombrera”. Tomado de: *Google Earth Pro*.

Para ver la imagen con mayor detalle dirigirse al Apéndice A.

1.4 Topografía zona de estudio.

Una vez definida la zona de estudio, y posterior a su análisis, se determinó que el relleno está conformado por un talud de pendiente aproximada de 40° , este colinda con la vía principal y en su corona tiene pendientes que no superan los 10° , donde se tiene proyectada la instalación de los paneles solares. (Ver Figura 4 y Figura 5)



Figura 4. Topografía zona “La Escombrera” Tomado de: Empresa Metropolitana Aseo de Bucaramanga EMAB.



Figura 5. Pendientes de la zona “La Escombrera”.

Es necesario aclarar que los planos topográficos obtenidos eran de principios del año 2019 (año de desarrollo del proyecto) y está sufrió cambios a lo largo de la ejecución del proyecto puesto

que esta zona aún se encuentra en periodo de operaciones. Para ver la imagen con mayor detalle dirigirse al Apéndice A.

1.5 Tipos de residuos y forma de relleno.

1.5.1 Tipos de residuos. Esta zona del relleno sanitario es llamada “La Escombrera” debido a que allí se depositan residuos de construcción como lo son los escombros, pero además a esta zona llegan también diferentes tipos de residuos de almacenes, ferreterías, fábricas, etc.; estos residuos tienen la particularidad de que en su mayoría carecen de materiales orgánicos. (Ver *figura 6, figura 7, figura 8*)



Figura 6. Fotografía de residuos presentes en la “Escombrera” (Entrada).



Figura 7. Fotografía de residuos presentes en la “Escombrera” (Botadero).



Figura 8. Fotografía de residuos presentes en la “Escombrera” (Talud).

1.5.2 Forma de relleno. Fue posible evidenciar en campo la forma en la que se disponen los residuos y el tratamiento que allí reciben, este consiste en el descargue del residuo para posteriormente ser mezcladas y compactadas reduciendo notablemente su volumen y formando así terrazas (Ver Figura 10 y Figura 11) con el fin de construir el talud que tiene esta zona de relleno (Ver Figura 9). Estas terrazas luego serán cubiertas por una capa de basura y suelo (de origen cercano al relleno sanitario), formando así un relleno con capas de residuos y de suelo con espesor totalmente heterogéneas. (Ver Figura 12).



Figura 9. Talud principal de “La Escombrera”.



Figura 10. Formación de terrazas al momento de compactar residuos en campo.



Figura 11. Formación de terrazas al momento de compactar residuos en campo.

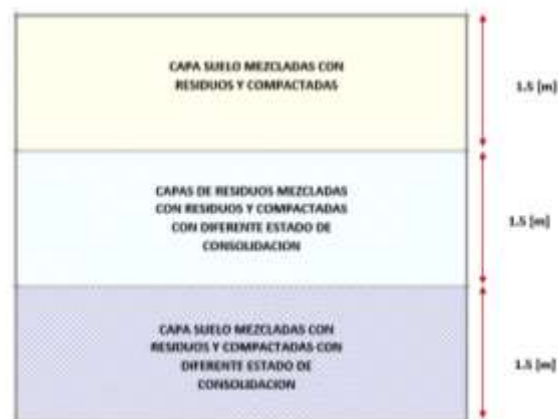


Figura 12. Probable perfil obtenido a partir de la forma del relleno.

1.6 Prospección Geofísica

Se denomina Prospección Geofísica a la aplicación de los conocimientos que ofrece la geofísica a la humanidad⁰. Es vista como un conjunto de técnicas físicas y matemáticas aplicadas a la exploración de subsuelos para la búsqueda y posterior estudio de yacimientos, de sustancias útiles (petróleo, agua subterránea, minerales, carbón, etc.) por medio de observaciones en la superficie de la tierra de las propiedades físicas de los materiales en el interior de ella. Los métodos geofísicos detectan discontinuidades (sitios donde las propiedades físicas de las rocas varían considerablemente) (Jaimes Villamizar, 2011), los métodos usados en esta investigación fueron los métodos sísmicos (MASW, refracción sísmica y ReMi) y el método de tomografía eléctrica.

1.6.1 Método Sísmico. Estos procedimientos se basan en las diferentes velocidades de propagación de las ondas vibratorias de tipo sísmico a través de diferentes medios materiales. Las mediciones realizadas permiten establecer que esa velocidad de propagación varía entre 150 y 2.500 m/s en suelos, correspondiendo los valores mayores a mantos de grava muy compactos y las menores a arenas sueltas; los suelos arcillosos tienen valores medios, mayores para las arcillas duras y menores para las suaves. (Jaimes Villamizar, 2011)

1.6.1.1 MASW. El método de MASW es normalmente usado para la caracterización geotécnica que busca extraer la variación de la velocidad de las ondas cortantes en función de la profundidad. La velocidad de la onda cortante es el parámetro más importante para determinar el diseño del suelo de la zona. Por lo tanto, la exactitud de la prueba y su correcta interpretación es

muy esencial para una estimación factible de los perfiles de velocidad de las ondas de corte. (Roy & Jakka, 2017)

1.6.1.2 Refracción sísmica. El método de refracción sísmica es un método geofísico que ha sido desarrollado para la investigación del subsuelo superficial. Ésta técnica nos proporciona de perfiles bidimensionales incluyendo profundidad y distancia que simplifican la caracterización de volúmenes relativamente largos de subsuelo.

El método de refracción sísmica fue el primer método geofísico en ser aplicado en la búsqueda de estructuras de soporte para el petróleo, pero esta aplicación en la exploración del petróleo se ha reducido a través de los años debido a la variedad de estudios modernos de reflexión. Sin embargo, éste método ha encontrado un aumento en su uso en la cartografía en pequeñas escalas de subsuelos cercanos a la superficie particularmente en investigaciones para la ingeniería civil y la ingeniería geotécnica. (Azwin, Saad, & Nordiana, 2013)

1.6.1.3 ReMi (*Refraction Microtremors*) Constituye uno de los más recientes avances entre los métodos geofísicos aplicados a la caracterización de sitio y evaluación de terrenos para ingeniería civil, es un método para obtener

Información general, en una dimensión, de volúmenes grandes de subsuelo. Las bases teóricas del método son las mismas que las del análisis Multicanales de ondas superficiales (MASW).

La fuente sísmica consiste de ruido sísmico ambiental o microtremores, los cuales son generados por ruido cultural y natural. Los registros son grabados en los equipos convencionales usados en sísmica. (Jaimes Villamizar, 2011)

1.6.2 Tomografía Eléctrica. La tomografía es una técnica geofísica que consiste en determinar la distribución de un parámetro físico característico del subsuelo dentro de un ámbito espacial limitado, a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno o desde los sondeos.

El objetivo de la tomografía eléctrica también conocida como ERT (Electrical Resistivity Tomography) es determinar la distribución real de la resistencia del subsuelo a lo largo de un perfil de medida.

Para este método es clave el número y distribución de las medidas de campo porque de ello depende la resolución como la profundidad de la investigación. Como regla general la tomografía eléctrica requiere la obtención de un número muy elevado de datos, con pequeños espaciados entre medidas para obtener la resolución adecuada.

El resultado del estudio es una sección de distancia-profundidad con la distribución de resistividad real del subsuelo. (Jaimes Villamizar, 2011)

2. Metodología

2.1. Ensayo de refracción sísmica

Para el ensayo de refracción sísmica se utilizó el sismógrafo GEODE, equipo que cuenta con 24 geófonos, un equipo principal, una batería para darle energía al sismógrafo y una porra que actúa como trigger para el registro de la onda.

Se realizaron tres ensayos de refracción sísmica variando la distancia de separación entre los geófonos, para este caso, se utilizaron separaciones de 1[m], 2[m] y 3[m], configurando así, tres líneas de 23[m], 46[m] y 69[m] de longitud respectivamente. La línea de 1[m], fue realizada en una ubicación distinta (1,5 [m] más abajo) a las líneas de 2[m] y 3[m], debido a la disponibilidad de la zona al momento de realizarse, ya que una parte de este terreno aún funciona como botadero de escombros y la diferencia de tiempo en el que se realizaron. (Ver **figura 11**).



Figura 13. Ubicación de las líneas de Refracción Sísmica.

Para este ensayo se utilizaron los geófonos azules que cuentan con una frecuencia de 14 [Hz] (Ver **figura 12**)



Figura 14. Geófonos azules de 14 [Hz].

En cada uno de los tres ensayos se realizaron nueve golpes con el trigger para el registro de las velocidades de onda, tres golpes al principio y tres golpes al final a una distancia correspondiente al 20% de la longitud final de la línea (Geometrics, 2009), en este caso a distancia de 4.5[m], a 9.2[m] y a 14[m] aproximadamente, para las líneas de 1[m], 2[m] y 3[m] respectivamente, y los últimos tres golpes, se realizaron en la mitad de la línea, entre el geófono 12 y 13.

Al realizarse los golpes, se realiza el proceso para el registro de los datos, para posteriormente ser procesados, esto se puede ver de forma detallada en el Apéndice C.

2.2. Ensayo de MASW

Para el ensayo de MASW, se realizaron tres líneas del mismo modo, con la excepción de que las tres líneas fueron realizadas en la misma jornada y se hicieron en la misma zona (Ver *figura 13*),

para esta práctica se utilizaron los 24 geófonos rojos con los que cuenta el sismógrafo GEODE que tienen una frecuencia de 4.5 [Hz]. (Ver *figura 14*)



Figura 15. Ubicación de las líneas del ensayo MASW.



Figura 16. Geófonos rojos de 4.5 [Hz].

Al realizar el montaje de la línea, se procede conectar los geófonos al sismógrafo GEODE y a realizar las diferentes conexiones de los elementos del sismógrafo. Para conocer el montaje completo del ensayo dirigirse al **Apéndice B**.

*Para el registro de los datos, se realizaron tres golpes entre geófonos y tres golpes al inicio y el final de la línea a una distancia correspondiente al 20% de la longitud final de la línea, del mismo modo que en el ensayo de refracción sísmica. Posteriormente se realiza el procesamiento de los datos registrados, que se puede ver en el **Apéndice C**.*

2.3. Ensayo Re-Mi

En el ensayo Re-Mi, debido al tiempo y a la disponibilidad del terreno al momento de realizar el ensayo se realizó solo una línea de 2[m] de separación entre geófonos, la cual permitía cubrir toda el área de terreno que se tenía disponible, para este ensayo se utilizaron los geófonos azules de 14 [Hz] de frecuencia.



Figura 17. Ubicación de la línea del ensayo Re-Mi.

Para este ensayo no se usó ninguna fuente para generar el registro de la onda, ya que el ensayo Re-Mi, funciona con los sonidos del ambiente que rodea el terreno, como tránsito, la

presencia de personas o los sonidos de la naturaleza, teniendo en cuenta esto, cada registro de datos se tomó cada 32 segundos.

Para conocer la configuración y el procesamiento de los datos del ensayo Re-Mi, dirigirse al Apéndice C.

2.4. Ensayo de tomografía eléctrica

Para determinar la presencia de agua subterránea en el subsuelo, se llevó a cabo el ensayo de tomografía eléctrica, este ensayo mide las resistividades del suelo en la superficie y genera una imagen de la resistividad de las estructuras del subsuelo. (Gomez Neira, 2014)

Lo primero que se realiza en campo, es el alineamiento de las estacas, para este caso se ubicaron cada 2[m], contando con el terreno de la zona que se tenía disponible, por lo tanto, se realizó una línea de 110[m] ya que, el equipo de tomografía eléctrica cuenta con 56 estacas con su respectivo electrodo. Después de esto, se extiende el cable principal según su numeración y se realiza la conexión con cada estaca.



Figura 18. Montaje de la línea de tomografía eléctrica.

Al tener montada la línea, se procede a realizar las conexiones al equipo Supersting, como la fuente de energía y la conexión del cable principal que está extendido en la línea. En este ensayo, se eligió el arreglo Wenner-Schlumberger ya que el estudio requería una mayor resolución tanto horizontal como verticalmente y es un arreglo que funciona bien en zonas de alto ruido. (Gomez Neira, 2014)

Posteriormente, se realizó el procesamiento de los datos, que se puede evidenciar en el

Apéndice C

3. Resultados

3.1 Refracción sísmica

Con este ensayo se obtuvo un perfil con valores de onda primaria (Onda P) a diferentes profundidades, para cada una de las líneas sísmicas realizadas, es decir, a 1[m] (Ver Figura 19), 2[m] (Ver Figura 20) y a 3[m] (Ver Figura 21).

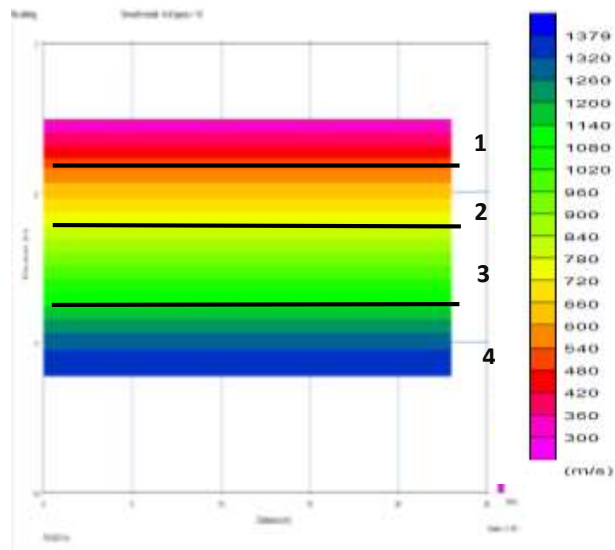


Figura 19. Modelo final de velocidades de onda P para la línea de 1[m].

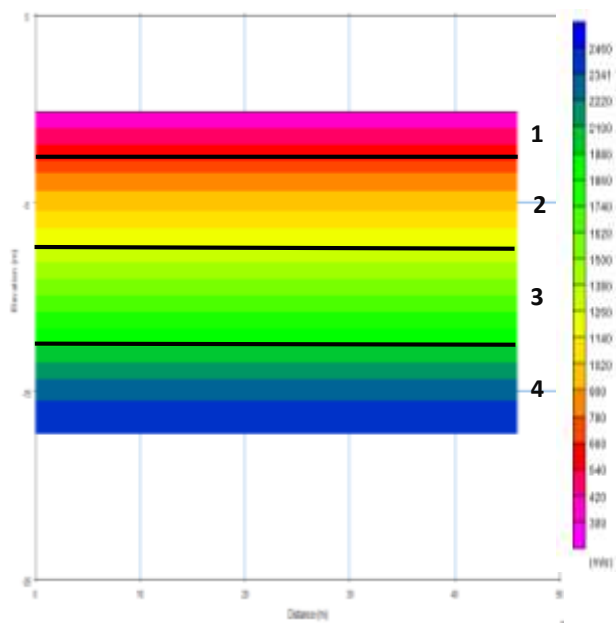


Figura 20. Modelo final de velocidades de onda P para la línea de 2[m].

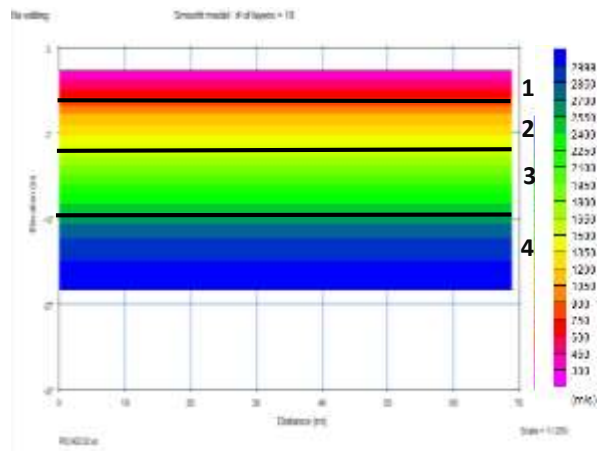


Figura 21. Modelo final de velocidades de onda P para la línea de 3[m].

Para conocer el procedimiento necesario para llegar a estos modelos de velocidades de onda P dirigirse al **Apéndice C**

Así mismo para observar las gráficas resultado del ensayo refracción sísmica con mayor detalle dirigirse al **Apéndice D**

El análisis de los resultados obtenido en este ensayo puede ser sintetizado en la siguiente tabla donde están los valores de onda P para cada una de las líneas sísmicas y sus posibles estratos. (Ver

Tabla 1)

Tabla 1.

Valores aproximados de V_p obtenidos en el ensayo de Refracción Sísmica para cada estrato.

ESTRATO	VpPROM aproximado (m/s)		
	Línea 1m	Línea 2m	Línea 3m
1	390	420	450
2	660	900	1050
3	1020	1620	1875
4	1317	2280	2750

El método de refracción sísmica supone que la velocidad de las ondas sísmicas es creciente con la profundidad. Como se conoce el posible estrato del relleno y se sabe que probablemente por la forma de disposición existen zonas intermedias blandas es necesario corroborar estos resultados con otro tipo de ensayo, en este caso se realizó el ensayo de MASW que logra registrar esta disminución de la velocidad de onda ya que este no ensayo no lo hace.

Observando la línea 2 y 3, se puede ver que los resultados no arrojaron diferencias significativas entre la realización de los ensayos, mientras que al hacerlo a diferente altura, como la línea 1, altera los resultados notablemente.

3.2. MASW

Con este ensayo se obtuvieron los resultados más representativos para poder determinar un perfil estratigráfico a partir de un análisis 1D y 2D de los datos de las líneas sísmicas.

3.2.1. Resultados MASW (Análisis 2D). Con este análisis es posible obtener para cada línea una imagen de velocidades de onda (en m/seg) vs. Profundidad (en m) y gráficamente se diferencian con colores las velocidades de onda S. (*Ver Figura 22, Figura 23, y Figura 24*).

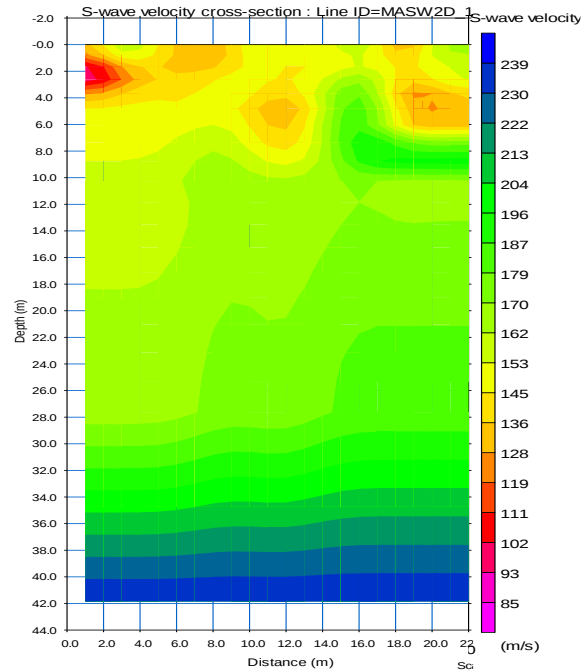


Figura 22. Perfil Vs vs. Profundidad (Línea 1[m]).

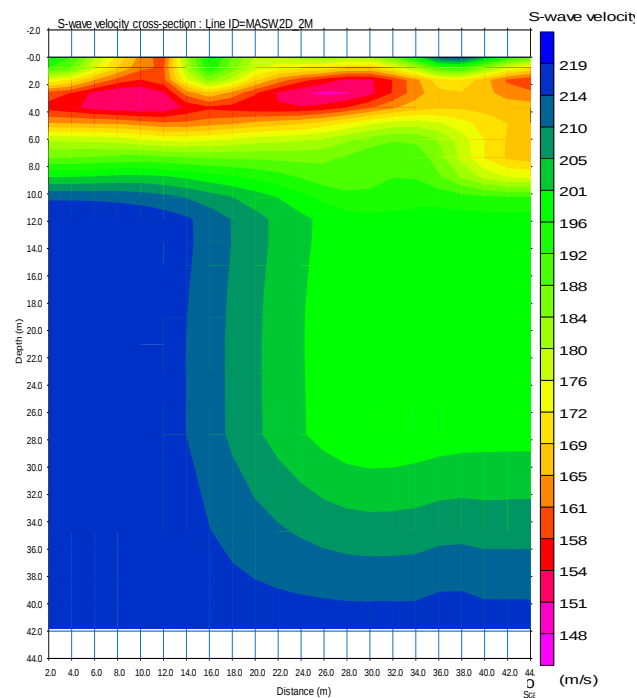


Figura 23. Perfil Vs vs. Profundidad (Línea 2[m]).

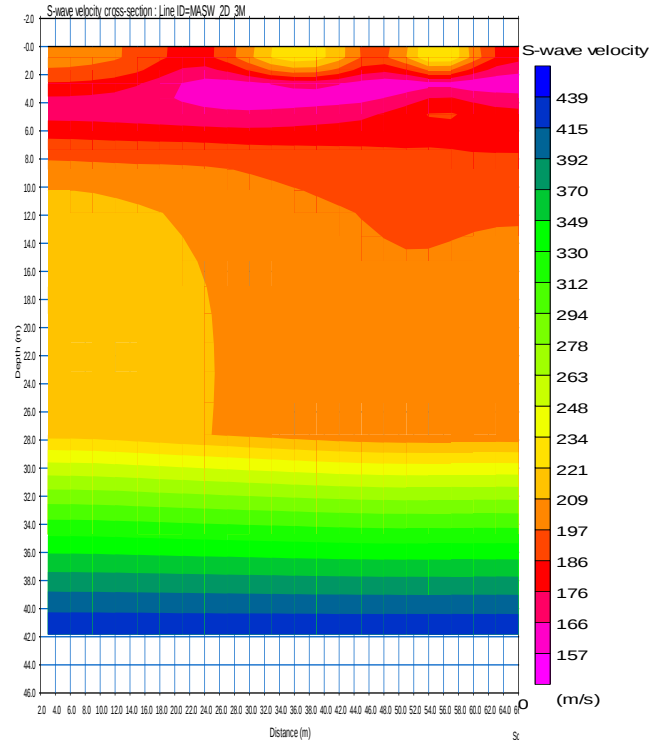


Figura 24. Perfil Vs vs. Profundidad (Línea 3[m]).

3.2.3. Resultados MASW (Análisis 1D). Este análisis permite obtener datos de velocidad de onda P, densidad y numero de golpes del ensayo SPT (N de campo) como se observa en la Figura 25 a la Figura 30 para determinadas profundidades a partir de correlaciones que el software posee, y en base a estos resultados es posible calcular diferentes parámetros del suelo usando las correlaciones de diferentes autores (las cuales están consignadas en el Apéndice E), como lo son sus módulos dinámicos y estáticos, peso específico (γ), ángulo de fricción (ϕ), resistencia al corte no drenada (C_u). (Ver Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4)

Con estos valores es posible suponer un perfil estratigráfico basado en los datos que tengan una similitud notable y analizando el comportamiento de los parámetros anteriormente mencionados, a continuación, se presentan las gráficas del comportamiento de estos valores en un perfil estratigráfico propuesto.

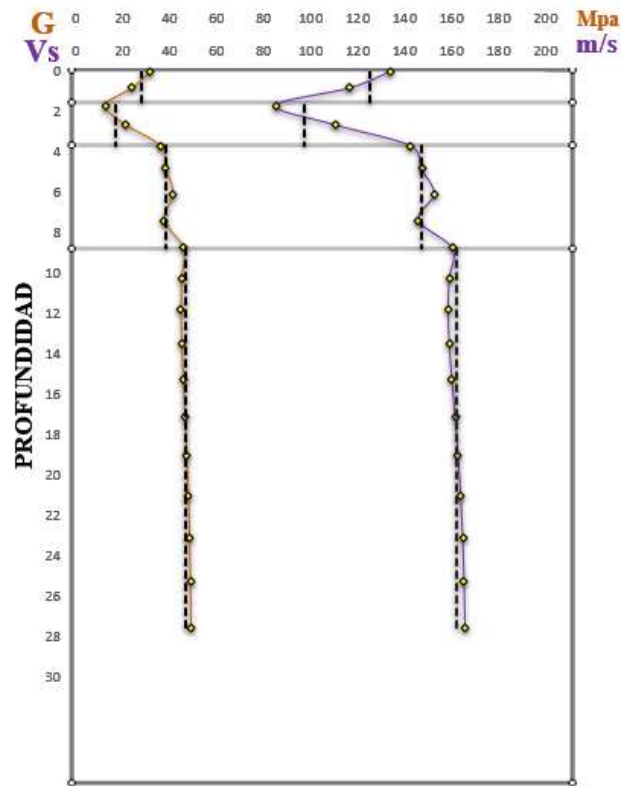


Figura 25. Las líneas de colores representan el comportamiento de V_s y G vs. Profundidad para la línea de 1[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.

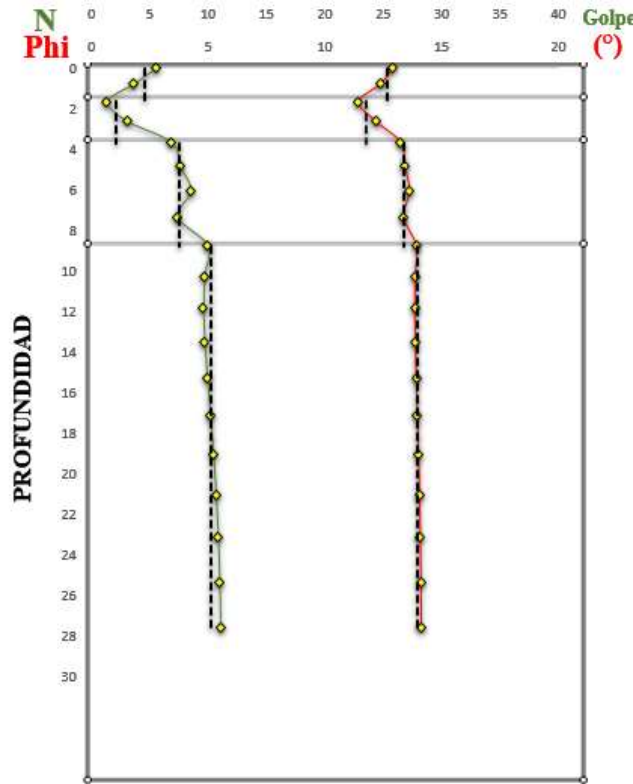


Figura 26. Las líneas de colores representan el comportamiento de N y ϕ vs. Profundidad para la línea de 1[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.

Tabla 2.

Valores promedio para espesores propuestos en orden descendente para la línea de 1[m].

Estrato	Valores promedio		
	$\gamma \left[\frac{kn}{m^3} \right]$	$\phi [^\circ]$	$Cu [Kpa]$
1 (0-1.7) (m)	17.31	25.26	10.07
2 (1.7-3.7)(m)	17.22	23.56	4.75
3 (3.7-8.7) (m)	17.39	26.8	16.62
4(>8,7) (m)	17.44	27.92	22.55

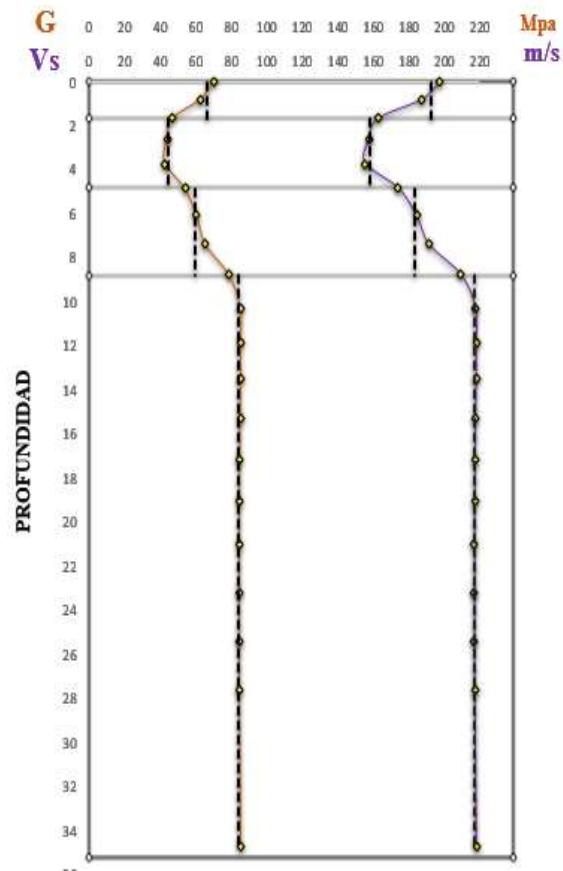


Figura 27. Las líneas de colores representan el comportamiento de V_s , G vs. Profundidad para la línea de 2[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.

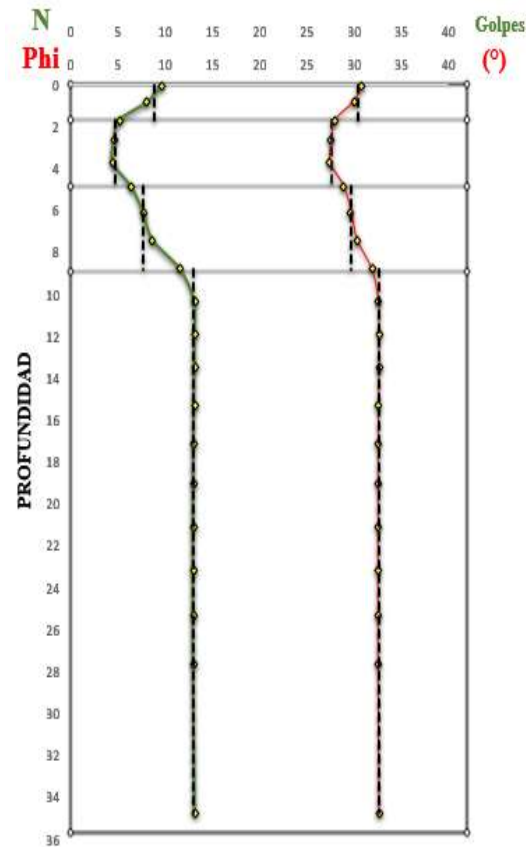


Figura 28. Las líneas de colores representan el comportamiento de N y ϕ vs. Profundidad para la línea de 2[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.

Tabla 3.

Valores promedio para espesores propuestos en orden descendente para la línea de 2[m].

Estrato	Valores promedio		
	$\gamma \left[\frac{kn}{m^3} \right]$	$\phi [^\circ]$	$Cu [Kpa]$
1 (0-1.7) (m)	17.55	30.42	39.08
2(1.7-4.8)(m)	17.43	27.64	20.99
3(4.8 – 8.8) (m)	17.52	29.65	33.55
4(>8.8) (m)	17.63	32.59	56.92

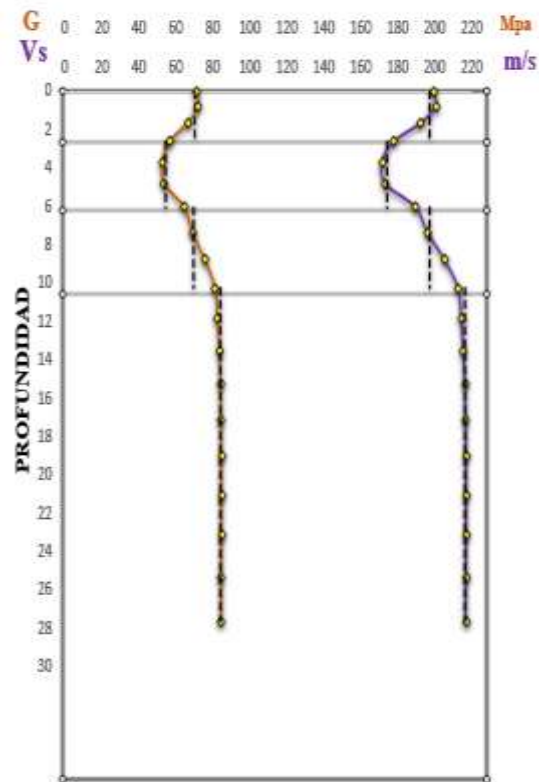


Figura 29. Las líneas de colores representan el comportamiento de V_s , G vs. Profundidad para la línea de 3[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.

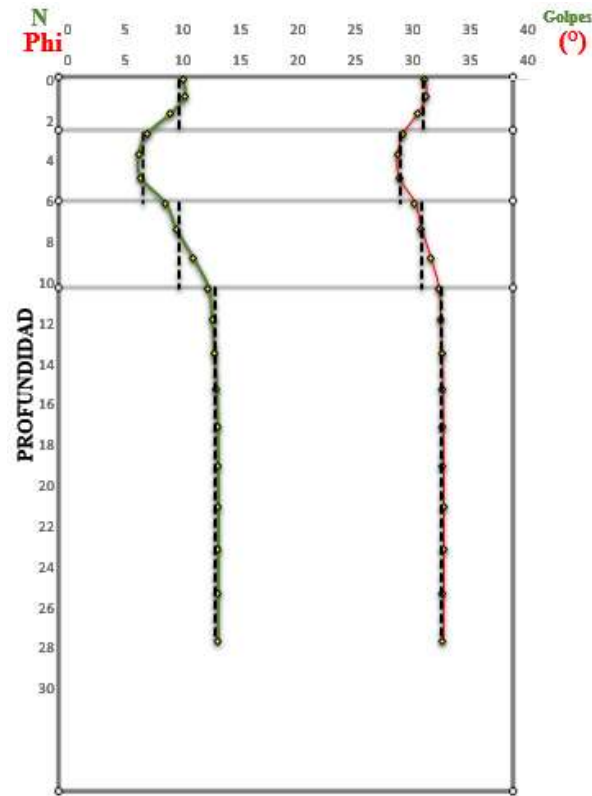


Figura 30. Las líneas de colores representan el comportamiento de N y ϕ vs. Profundidad para la línea de 2[m] en los estratos propuestos, y la línea punteada representa los valores promedios para cada estrato de los parámetros mencionados.

Tabla 4.

Valores promedio para los espesores propuestos en orden descendente para la línea de 3[m].

Estrato	Valores promedio		
	$\gamma \left[\frac{kn}{m^3} \right]$	$\phi [^\circ]$	$Cu [Kpa]$
1 (0-1.7) [m]	17.57	30.89	42.63
2(1.7-6)[m]	17.49	28.92	28.59
3(6-10.2) [m]	17.57	30.85	42.38
4(>10.2) [m]	17.63	32.56	56.65

Se enuncian las correlaciones y hojas de cálculo usadas para llegar a los resultados anteriormente expuestos y las desviaciones estándar de los valores de Vs, N y G con respecto a su valor promedio para la línea de 1[m], 2[m] y 3[m] en el **Apéndice E**

3.3. Obtención perfil estratigráfico

Para definir un perfil, es necesario comparar los resultados obtenidos en estos ensayos con los valores típicos para cada material.

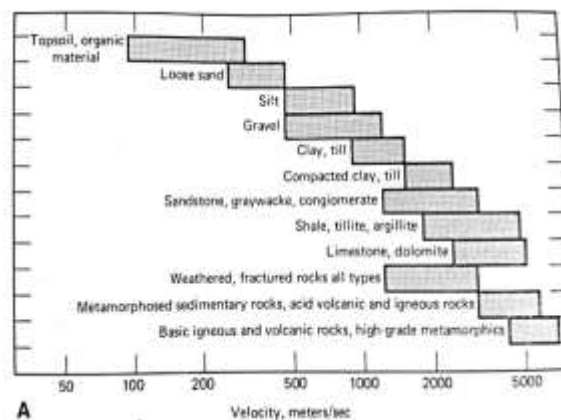


Figura 31. Caracterización de materiales según la velocidad de onda longitudinal. Tomado de: Perry H. Rahn., (1986) *Engineering Geology An Enviromental Approach*, USA, Elsevier Science Publishing,.

3.4. ReMi (Refraction Microtremors)

Los resultados de este ensayo están basados en fuentes pasivas de perturbación como lo es el ruido del ambiente y factores antrópicos cercanos a la zona de estudio, estos resultados presentan un

comportamiento distinto a los obtenidos con los ensayos con fuentes activas, ya que el método Re-Mi es utilizado para la obtención de velocidades de onda superficiales de forma indirecta, es decir a partir de fuentes externas, por lo tanto estas pueden afectar la calidad y precisión de los datos.

(Ver *figura 32*)

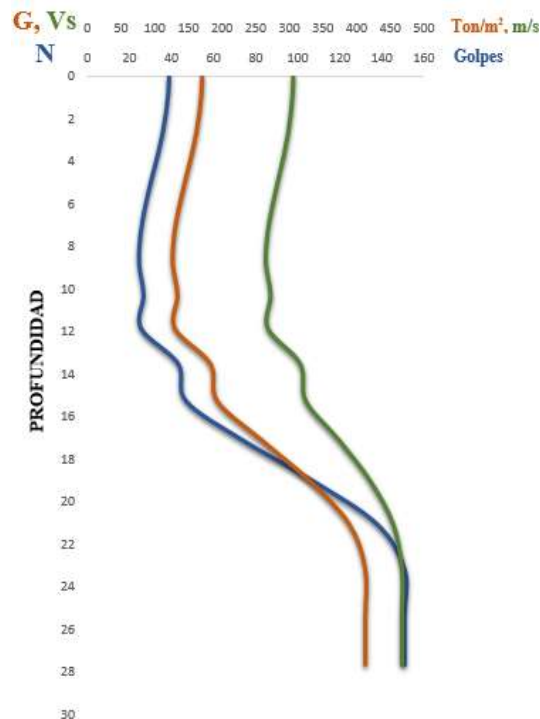


Figura 32. Comportamiento de Vs, G y N vs. Profundidad para el ensayo Re-Mi.

3.5. Tomografía Eléctrica

A partir del ensayo de tomografía eléctrica fue posible observar un perfil de resistividades, con este perfil es posible proponer la existencia de agua subterránea en la zona de estudio y de intentar relacionar los materiales presentes en el terreno con otros materiales a partir de su valor de resistividad. (Ver *Figura 33* y *Figura 34*).

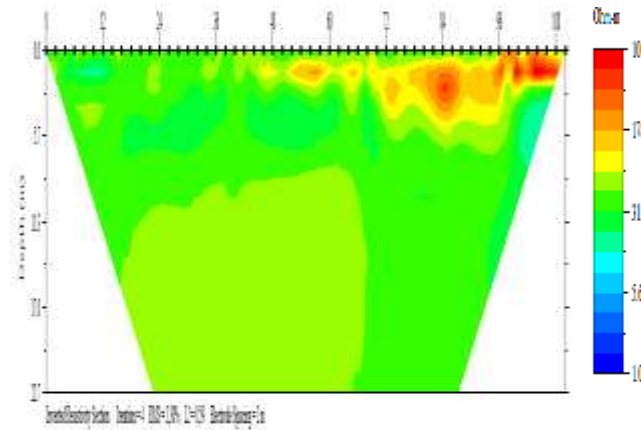


Figura 33. Perfil de resistividades del suelo (superficie plana).

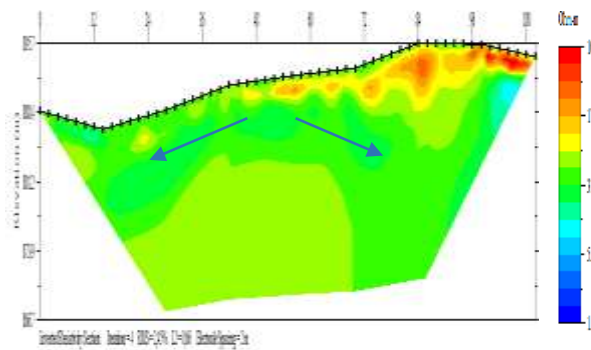


Figura 34. Perfil de resistividades del suelo con altimetría.

Para ver con más claridad los resultados del ensayo de tomografía, dirigirse al **Apéndice D**

Una vez obtenido este perfil se procede a relacionar los valores y colores de resistividades del suelo con los posibles valores para cada material, para esto es necesario usar tablas con valores determinísticos para cada material. (Ver **Figura 35**)

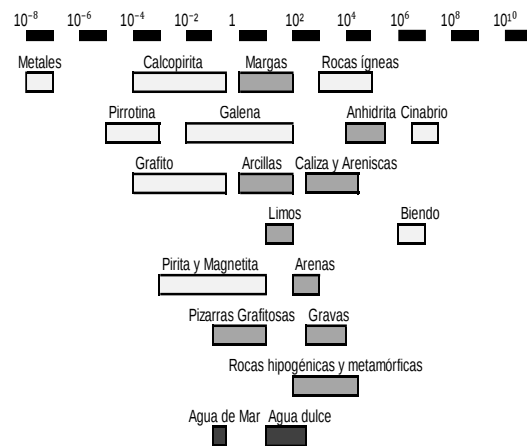


Figura 35. Rango de resistividades para diferentes elementos del subsuelo. Tomado de: Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo.

Con estos valores se puede realizar un análisis del perfil obtenido, la principal conclusión es que en este perfil se puede observar la presencia de agua posiblemente debido a que se realizó el ensayo en época de lluvia y los días anteriores al ensayo se habían presentado lluvias en la zona de estudio, esto se puede explicar con la topografía, debido a que la pendiente del lugar nos da un indicio de que al agua está fluyendo, entonces estos valores de resistividades bajas se deben a flujos de agua que humedecen el suelo del relleno. Otra posible causa de la presencia de agua en el relleno se debe a la vegetación presente en los alrededores de la zona de estudio, esta vegetación retiene agua y es posible que la “mancha” azul que se ve en la gráfica sea precisamente por esto ya que en esta zona es donde se encuentra la vegetación del lugar.

Una vez realizado el análisis de todos los ensayos es posible llegar a proponer un perfil tipo para la zona de estudio, a continuación, se expone la propuesta de perfil a la que se llegó a partir de los resultados de los ensayos.

Tabla 5.

Perfil propuesto para “La Escombrera” a partir de los resultados obtenidos en ensayos sísmicos y tomografía eléctrica.

Estrato	Profundidad (m)	Posible Material	Tomografía
1	0 - 2	Capa de Material de relleno y residuos recientemente dispuestos. (Material Areno- Arcilloso)	Capa probablemente seca (Ohm/m aprox.)
2	2- 6	Capa de residuos y relleno.	Capa con presunta presencia humedad. (31.6 ohm/m en promedio aprox.)
3	6- 10	Capa de Material de relleno y residuos con diferente estado de consolidación. (Material Areno-Arcilloso)	Capa con presunta presencia de humedad. (15 ohm/m en promedio aprox.)
4	>10	Capa de relleno y residuos con avanzado estado de consolidación	Capa que se supone sin presencia de humedad debido al estado de consolidación de sus componentes. (105 ohm/m en promedio aprox.)

4. Conclusiones

Se encontró que “La Escombrera” es un sitio de disposición de residuos de tipo no orgánico, que no posee un tratamiento convencional de relleno sanitario, es decir, se trata como un botadero a cielo abierto que se compone de terrazas de aproximadamente 33.2° de pendiente y una altura aproximada de 1.5[m] y en la cabeza de la terraza se presenta una pendiente de 5° aproximadamente; en esta terraza es donde se propone la instalación de las estructuras de los paneles solares.

A partir de la información suministrada por los operarios de “La Escombrera”, el proceso de disposición se lleva a cabo mediante la conformación de terrazas formando capas de residuos mezclados con suelo de relleno de aproximadamente 1.5 [m] de espesor, y esta tendencia se mantiene en toda la profundidad del relleno. Esta información ha sido comprobada mediante los resultados obtenidos en los ensayos de Refracción Sísmica y MASW, los cuáles arrojaron un perfil tipo de cuatro capas en el cuál la capa superior presenta velocidades de onda mayores con una mayor densidad, seguida de una capa intermedia con velocidades de onda y densidades inferiores y las últimas dos capas presentan velocidades de onda superiores hasta llegar a un punto en el que el proceso de consolidación que ha sufrido el material es avanzado, que ocasiona que el valor de velocidad de onda se estabilice.

Se determinó por medio del ensayo de tomografía eléctrica que en la zona de estudio existen flujos de agua debido a las propiedades del suelo, ya que al tratarse posiblemente de un suelo areno arcilloso hay infiltraciones y retenciones de agua en algunos puntos, también se puede evidenciar

que la topografía y la presencia de vegetación en la zona, provoca la retención de pequeñas masas de agua en zonas específicas. Del ensayo de tomografía eléctrica, también se puede concluir que el subsuelo no presenta nivel freático.

Los métodos geofísicos representan un método complementario, es decir, que se hace necesario corroborar e integrar estos resultados con ensayos de campo tradicionales y ensayos de laboratorio para obtener una caracterización geotécnica más precisa y completa.

5. Recomendaciones

Es muy importante tener en cuenta que la capacidad portante del suelo es un parámetro decisivo al momento de decidirse si se inicia la construcción de cualquier estructura, en este caso, la evaluación de la capacidad portante será fundamental en el diseño de las cimentaciones para soportar las estructuras metálicas del parque solar.

En segunda instancia, el control de asentamientos y deformaciones del suelo se hace necesario a la hora de la instalación de las estructuras del parque solar, control que se puede llevar a cabo por medio de un modelamiento 3D.

La ampliación de la exploración geotécnica de la zona, es un factor muy importante para determinar el comportamiento del suelo a largo plazo, ya que este puede sufrir deformaciones y asentamientos con el paso del tiempo.

Referencias Bibliográficas

- Arias, J., & Pineda, J. L. (2017). Nueva emergencia sanitaria: El Carrasco operará 36 meses más. *Vanguardia*. Retrieved from <http://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/410807-nueva-emergencia-sanitaria-el-carrasco-operara-36-meses-mas>
- Azwin, I. N., Saad, R., & Nordiana, M. (2013). Applying the Seismic Refraction Tomography for Site Characterization. *APCBEE Procedia*, 5, 227–231. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.039>
- Chio, J. C. (2017). 15 años esperando una solución para El Carrasco. *Vanguardia*. Retrieved from <http://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/412777-15-anos-esperando-una-solucion-para-el-carrasco>
- Clover, I. (2017). UK to transform three landfill sites into 70 MW of solar farms – pv magazine International. Retrieved October 1, 2018, from <https://www.pv-magazine.com/2017/09/01/uk-to-transform-three-landfill-sites-into-70-mw-of-solar-farms/>
- Geometrics. (2009). SeisImager/SW, 50(m), 314.
- Gomez Neira, Y. S. (2014). *Fases I y II de la práctica empresarial en el grupo de investigación geomática como auxiliar de ingeniería en el levantamiento de tomografías eléctricas 2d en el proyecto “estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por remoción en masa del municipio de V.*
- Jaimes Villamizar, J. D. (2011). *Metodos geofisicos aplicados a la caracterizacion de suelos: estado del arte*, 109.
- Prado Llanes, L. (2014). Relleno sanitario (Landfill), El Carrasco, Bucaramanga, Colombia | EJAtlas. Retrieved July 21, 2019, from <https://ejatlas.org/conflict/relleno-sanitario-landfill-el-carrasco-bucaramanga-colombia>

- Roy, N., & Jakka, R. S. (2017). Near-field effects on site characterization using MASW technique. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97(August 2015), 289–303. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.02.011>
- Sampson, G. (2009). Solar Power Installations on Closed Landfills: Technical and Regulatory Considerations, (September), 1–36. Retrieved from <http://clui-in.org/download/studentpapers/Solar-Power-Installations-on-Closed-Landfills-Sampson.pdf>
- Tansel, B., Varala, P. K., & Londono, V. (2013). Solar energy harvesting at closed landfills: Energy yield and wind loads on solar panels on top and side slopes. *Sustainable Cities and Society*, 8, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.004>