



**CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN EL BARRIO EL ORFANATO,  
MUNICIPIO DE PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER, MEDIANTE LA  
APLICACIÓN MÉTODOS GEOFÍSICOS Y GEOTÉCNICOS**

**Favián Alveiro Hernández Anaya**

**Michael Andrés Rodríguez Vergara**

**Universidad de Pamplona  
Facultad de Ingenierías y Arquitectura  
Programa Ingeniería civil  
Pamplona, Colombia  
2021**

Caracterización del subsuelo en el barrio el Orfanato, Municipio de Pamplona, Norte de Santander, mediante la aplicación de los métodos geofísicos y geotécnicos. ii

Favián Alveiro Hernández Anaya  
Michael Andrés Rodríguez Vergara

Trabajo de grado modalidad investigación presentado como requisito parcial para optar el título  
de

**Ingeniero Civil**

Director:

Jairo Alberto Torres Peña

Línea de Investigación:

Métodos de exploración geofísica aplicados a la Ingeniería Civil

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en Ingeniería civil- ETENOHA  
Grupo de investigación en Geofísica y geología- PANGEA

Universidad de Pamplona  
Facultad de Ingenierías y Arquitectura  
Programa Ingeniería civil  
Pamplona, Colombia  
2021

This research presents the application of some geophysical and geotechnical techniques, used for the characterization of the subsoil in the neighborhood of El Orfanato, municipality of Pamplona, Norte de Santander (Colombia). The geophysical techniques applied in this study were the Vertical Electric Sounding (SEV), the Seismic Refraction Tomography (TRS) and the Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), for the geotechnical area the technique that was applied for this study was the Standard Penetration Test (SPT), the methodology used was developed in three (3) stages: the field stage that consisted of the survey of two (2) seismic lines, where a topographic survey was carried out, two (2) tests of standard penetration (SPT) to a maximum depth of 3.66 meters, twelve (12) vertical electrical soundings (SEV), for the acquisition of data from seismic refraction tomography (TRS) and multichannel analysis of surface waves (MASW 1D and 2D) are made a laying of two (2) lines of 80.5 meters in length. The data processing stage in which the data acquired in the field stage were processed, through laboratory tests and specialized software. The data analysis and interpretation stage in which the acquired data is correlated, which results in a type D soil profile, which is classified by the National building code (NSR-10), in the The study area shows the presence of inorganic silts and clayey sands, P wave speeds between 270 m / s and 700m / s, S wave speeds between 320 m / s and 360 m / s.

**Keywords:** Geotechnics; Seismic Refraction; Elastic wave. Compression wave, Geoelectric

En esta investigación se presentan la aplicación de algunas técnicas geofísicas y geotécnicas, utilizadas para la caracterización del subsuelo en el barrio el Orfanato, municipio de Pamplona, Norte de Santander (Colombia). Las técnicas geofísicas aplicadas en este estudio fueron el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), la Tomografías de Refracción Sísmica (TRS) y el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), para el área de geotécnica la técnica que se aplicó para este estudio fue el Ensayo de Penetración Estándar (SPT), la metodología utilizada se desarrolló en tres (3) etapas: la etapa de campo que consistió en el levantamiento de dos (2) líneas sísmicas, donde se realizó un levantamiento topográfico, dos (2) ensayos de penetración estándar (SPT) a una profundidad máxima de 3.66 metros, doce (12) sondeos eléctricos verticales (SEV), para la adquisición de datos de tomografía de refracción sísmica (TRS) y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D y 2D) se hizo un tendido de dos (2) líneas de 80.5 metros de longitud. La etapa de procesamiento de datos en la cual se procesaron los datos adquiridos en la etapa de campo, mediante ensayos de laboratorio y software especializado. La etapa de análisis e interpretación de datos en la que se hace la correlación de los datos adquiridos los cuales dan como resultados, un perfil del suelo tipo D, el cual es clasificado mediante el código de construcción Nacional (NSR-10), en el área de estudio se observa la presencia de limos inorgánicos y arenas arcillosas, velocidades de onda P entre 270 m/s y 700m/s, velocidades de onda S entre 320 m/s y 360 m/s.

**Palabras clave:** Geotecnia; Refracción Sísmica; Onda elástica. Onda compresional, Geoelectrica.



Introducción.....	1
7.1 1. Antecedentes.....	3
7.2 2. Objetivos .....	5
2.1 Objetivo general .....	5
2.2 Objetivos específicos .....	5
3. Marco contextual .....	6
3.1 Localización geográfica .....	6
3.2 Marco teórico.....	7
3.2.1 Ondas sísmicas .....	7
3.2.2 Método de refracción sísmica.....	11
3.2.3 Método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) .....	14
3.2.4 Método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) .....	15
3.2.5 Exploración del subsuelo .....	17
3.2.5.1 Ensayo de penetración estándar (SPT).....	17
3.2.5.2 Análisis de laboratorio .....	20
4. Metodología .....	25
4.1 Primera etapa de campo .....	25
5.2 Segunda etapa de procesamiento de datos .....	30
5.2.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV) .....	30
5.2.2 Tomografía de refracción sísmica (TRS).....	31
5.2.3 Análisis multicanal de ondas superficiales MASW .....	33
5.2.4 Ensayo de penetración estándar (SPT de sus siglas en ingles) .....	36
5.3 Tercera etapa de análisis e interpretación de datos .....	36
7.3 Capítulo 4 .....	37
7.4 6. Resultados.....	37
6.1 Sondeo eléctrico vertical SEV.....	37
6.2 Tomografía de refracción sísmica TRS .....	40
6.3 Análisis multicanal de ondas superficiales MASW .....	41
6.4 Ensayo de penetración estándar SPT .....	43
7. Análisis de resultados.....	47
7.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV) .....	47
7.2 Tomografía de refracción sísmica (TRS).....	48
7.3 ANALISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW).....	48
7.3.1 MASW 1D.....	49
7.3.2 MASW 2D.....	49
7.4 Ensayo de penetración estándar (SPT) .....	49
Conclusiones .....	50
Lista de referencias .....	52

## Lista de tablas

vii

Tabla 1. Coordenadas de las líneas de ensayo.....	6
Tabla 2 Coeficientes de corrección SPT .....	20
Tabla 3. Correcciones del ensayo SPT, perforación 1 .....	36
Tabla 8. Velocidades de onda S MASW 1D .....	41
Tabla 4 Perfil estratigráfico SPT 1.....	44
Tabla 5 Perfil estratigráfico SPT 2.....	45
Tabla 6 Correcciones del ensayo SPT, perforación 2 .....	46
Tabla 7 Parámetros del suelo (Novo SPT) .....	46

Figura 1 Localización de la zona de estudio.....	7
Figura 2 Modelo de propagación de las ondas P .....	9
Figura 3 Modelo de propagación de las ondas S .....	9
Figura 4 Modelo de propagación de las ondas Rayleigh .....	10
Figura 5 Modelo de propagación de las ondas Love .....	11
Figura 6 Esquema general del equipo para el ensayo de penetración estándar (SPT), sistema de soga: A. sentido antihorario, B. sentido horario.....	18
Figura 7 Muestreador de tubo partido .....	19
Figura 8 Ensayo contenido de humedad.....	21
Figura 9 Ensayo de granulometría, a. pesado de la muestra, b. lavado de la muestra, c. tamizado de la muestra, d. material retenido en cada tamiz. ....	22
Figura 10 Cazuela de Casagrande .....	23
Figura 11 Límites de Atterberg, a y b. determinación del límite líquido.....	24
Figura 12 Equipo topográfico RTK Stonex S800 GNSS, a. estación base; b. estación móvil. ....	26
Figura 13 Equipo geoelectrónica (GeoAmp) .....	27
Figura 14 Equipo de MASW .....	28
Figura 15 Geometría de adquisición de datos sísmicos, a. TRS, b. MASW 1D, c. MASW 2D ..	29
Figura 16 Equipo de ensayo de penetración estándar (SPT).....	30
Figura 17 Procesamiento sondeo eléctrico vertical, a) Dispersión de las resistividades en función del espaciamiento, b) curva de resistividad aparente $V_s$ AB/2, c) profundidad de las capas respecto a la resistividad .....	31
Figura 18 Procesamiento de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS). a) Picado de los primeros arribos de la onda refractada. b) Selección de capas. c) Modelo final a partir de la inversión por tomografía.....	32
Figura 19 Procesamiento de Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D). a) Registro de las ondas superficiales, b) Curva de dispersión, c) Modelo inicial. ....	34
Figura 20 Procesamiento de Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 2D). a) Registro del tren de ondas superficiales, b) Curva de dispersión, c) Modelo inicial, d) Modelo final. .....	35
Figura 21 Sondeo Eléctrico Vertical (línea 1) .....	37
Figura 22 Sondeo Eléctrico Vertical (línea 2) .....	39
Figura 23 Tomografía de Refracción Sísmica (línea 1) .....	40
Figura 24 Tomografía de Refracción Sísmica (línea 2) .....	41
Figura 25 Análisis multicanal de ondas superficiales, MASW 2D (línea 1).....	42
Figura 26 Análisis multicanal de ondas superficiales, MASW 2D (línea 2).....	43



## **Introducción**

El objetivo de esta investigación es realizar estudios geofísicos y geotécnicos que permitan correlacionar las propiedades del subsuelo del área de estudio para hacer la respectiva caracterización de acuerdo a la norma sismo resistente colombiana (NSR-10).

El reconocimiento geológico es fundamental en los ensayos de exploración geotécnica y este debe ser el eje en todas las etapas del proyecto desde la planeación hasta el monitoreo e incluso después de terminada la obra; para realizar la caracterización geotécnica también se utilizan técnicas de exploración no invasivas como lo son las geofísicas las cuales han tenido gran éxito en el área de la geotecnia ya que permiten obtener modelos de velocidad de onda P y S, permitiendo obtener modelos en los cuales se puede conocer el comportamiento elasto-dinámico de los estratos encontrados en el área de estudio a través de los cálculos de los módulos de Young, módulo de Rigidez y la relación de Poisson.

El método de refracción sísmica ha sido una de las técnicas más utilizadas en la exploración geotécnica, ya que permite determinar la profundidad a basamento en proyectos de represas, hidroeléctricas, además permite determinar la meteorización y fracturación de las rocas, esta técnica en particular es muy útil a la hora de detectar fallas geológicas, consiste en medir los tiempos de recorrido de las ondas P desde la fuente sísmica hasta una serie de geófonos que se encuentran ubicados a lo largo de una línea de adquisición, la refracción sísmica permite realizar un perfil modelo de onda P en función de la profundidad y la distancia a lo largo de la línea.

La integración de resultados de exploración geofísica con el soporte de reconocimiento geológico permite generar una interpretación sobre el contexto litológico-estructural del subsuelo, lo cual ofrece una base de conocimiento que permiten reducir la incertidumbre e incrementa el éxito en la exploración permitiendo ubicar de manera más precisa las pruebas invasivas como lo son el ensayo de penetración estándar (SPT)

### 7.1 1. Antecedentes

Las técnicas geofísicas se han convertido en un gran aliado en la geotecnia, ya que permite deducir las condiciones del suelo mediante la observación de los fenómenos físicos relacionados con la estructura geológica, permitiendo determinar los parámetros de fundación.

La actividad sísmica en Colombia ésta asociada a cuatro zonas principales: Sismos de corteza: asociados a sistemas de falla; sismos de subducción del Pacífico; sismicidad de Boyacá - Santander y Nido de Bucaramanga; Sismicidad de corteza difusa (Taboada et al. 1998).

Aplicación de técnicas geofísicas, ensayos de penetración estándar y análisis de laboratorios, en el municipio de Pamplona, Norte de Santander (“Gutiérrez pico,2016”, “Álvarez Ruiz, 2019”, “Moya Gutiérrez, Torres Peña, Contreras Martínez, 2020”)

En el Relleno Sanitario Regional “La Cortada”, Pamplona (Norte de Santander) los parámetros geotécnicos fueron obtenidos a partir de datos geofísicos usando las técnicas de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE). Este trabajo abarco el diseño, la adquisición, el procesamiento y la interpretación de los datos geofísicos. Se obtuvieron perfiles de suelos D y C asociados a areniscas de granos muy finos con ángulos de fricción; Coeficiente de Poisson entre 0,399 y 0,44; Densidades entre 1464,8 – 1538,5 Kg/m<sup>3</sup> entre otros parámetros de importancia. La aplicación de técnicas geofísicas actuales y modernas como complemento en la caracterización

geotécnica en estudios de ingeniería, es un aporte novedoso en las ciencias de la ingeniería y la geotecnia. (Sánchez Duarte, 2020)

## 7.2 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Caracterizar el subsuelo en el barrio el orfanato, municipio de Pamplona, Norte de Santander mediante la aplicación de métodos geofísicos y geotécnicos.

### 2.2 Objetivos específicos

- Identificar las resistividades eléctricas de los materiales encontrados en el sitio de estudio mediante la aplicación de los sondeos eléctricos verticales.
- Establecer los valores de velocidad de onda P y S de los materiales encontrados en el sitio de estudio mediante la aplicación del ensayo de tomografía de refracción sísmica (TRS) y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) respectivamente.
- Determinar mediante ensayos de laboratorio el contenido de humedad, los límites líquidos, índice plástico y el tamaño de los granos para las muestras recolectadas que se encuentren en el sitio de estudio a partir del ensayo de SPT.
- Calcular los parámetros dinámicos como peso específico " $\gamma$ ", módulo de Young " $E$ ", módulo de poisson " $\nu$ ", a partir de los ensayos directos usando SPT.
- Clasificación del tipo de suelo según la Norma Sismo Resistente, colombiana NSR-10 basados en los ensayos aplicados.

### 3. Marco contextual

#### 3.1 Localización geográfica

El municipio de Pamplona se encuentra ubicado en las coordenadas 72° 39' de longitud oeste y a 7° 23' de latitud norte; está situado a 2200 metros sobre el nivel del mar. Limita al Norte con Pamplonita Y Cucutilla al Sur con los municipios de Cacota y Mutiscua, al oriente con Labateca y al occidente con Cucutilla. Tiene una extensión total de 318 km<sup>2</sup> y una extensión de área urbana de 59.214 km<sup>2</sup> con 76.983 habitantes aproximadamente. Una extensión de área rural de 1.176 km<sup>2</sup> y una temperatura media de 16°C. (CORPONOR, 2002)

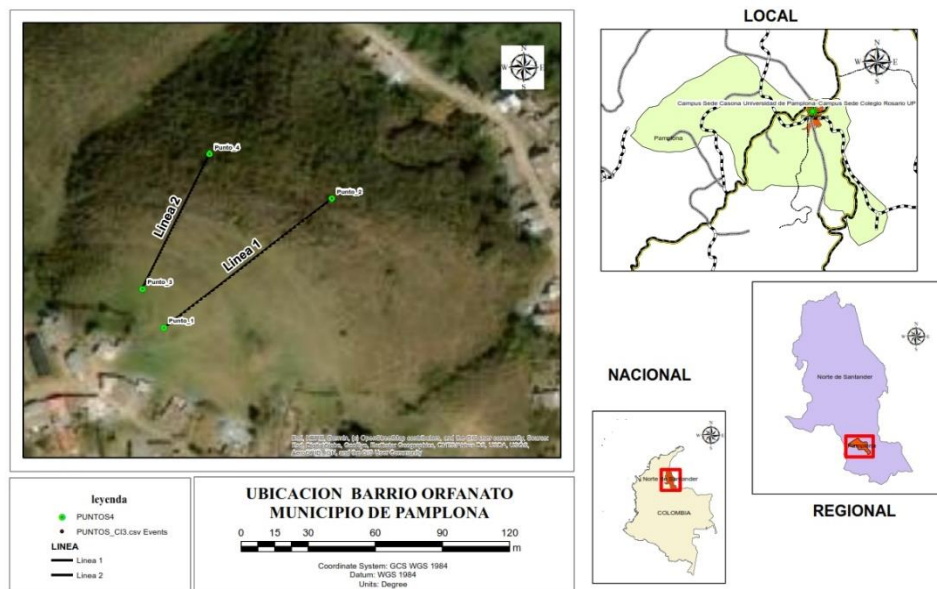
El sitio de estudio cuenta con dos (2) vías de acceso, una de ellas se encuentra ubicada por la vía nacional que conduce de Pamplona a Bucaramanga, la otra es por el barrio Santa Marta. Ver figura 1.

*Tabla 1. Coordenadas de las líneas de ensayo.*

Coordenadas de las líneas	INICIO		FINAL	
	LATITUD	LONGITUD	LATITUD	LONGITUD
Línea 1	7° 23' 05.24" N	72° 39' 07.18" O	7° 23' 07.11" N	72° 39' 04.75" O
Línea 2	7° 23' 05.80" N	72° 39' 07.49" O	7° 23' 07.75" N	72° 39' 06.52" O

*Fuente. Autores*

**Figura 1 Localización de la zona de estudio.**



*Fuente. Autores*

## 3.2 Marco teórico

### 3.2.1 Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas (u ondas elásticas) son la propagación de perturbaciones temporales del campo de esfuerzos que generan pequeños movimientos en un medio, estas pueden ser generadas por movimientos telúricos naturales, los más grandes de los cuales pueden causar daños en zonas donde hay asentamientos urbanos. Las ondas sísmicas pueden ser generadas también artificialmente (explosiones, golpes en el terreno, etc.). La sísmica propiamente dicha está dentro de la rama de la sismología que estudia estas ondas artificiales que son utilizados en la exploración e investigación geofísica. Dichas ondas están compuestas por energía que viaja a través del subsuelo y son

registradas por diversos aparatos, como, por ejemplo: Acelerógrafos, sismómetros y sismógrafos. Estas ondas se dividen en dos categorías: las ondas corporales que viajan por el interior del subsuelo y las ondas superficiales que viajan por la superficie del subsuelo. (López, 2016)

### **3.2.1.1 Ondas sísmicas corporales**

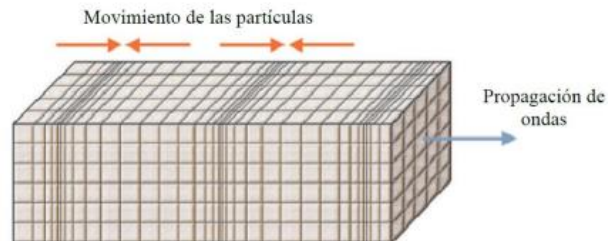
Las ondas de cuerpo viajan a través del interior de la tierra. Siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de la tierra. Este efecto es similar al de refracción de ondas de luz. Las ondas de cuerpo transmiten los movimientos preliminares de un terremoto el cual pueden poseer poca fuerza destructiva. Las ondas de cuerpo son divididas en dos grupos: ondas primarias (P) y secundarias (S). (López, 2016)

- **Ondas primarias o compresionales**

Conocidas en el ámbito de la geofísica como ondas P, son ondas longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación (Ver Figura 2). Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material. Velocidades típicas son 330 m/s en el aire, 1450 m/s en el agua y cerca de 5000 m/s en el granito. (López, 2016)



**Figura 2 Modelo de propagación de las ondas P**



**Fuente. Anderson et al, 2003**

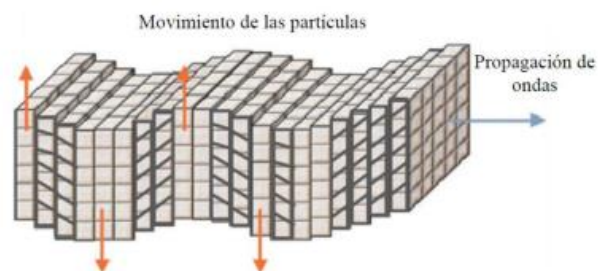
- **Ondas secundarias o de corte**

Conocidas como ondas S, son ondas transversales o de corte, lo cual significa que el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro (Ver Figura 3). Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte.

Usualmente la onda S tiene mayor amplitud que la P y se siente más fuerte que ésta. En el núcleo externo de la tierra, que es un medio líquido, no permite el paso de las ondas S.

(López, 2016)

**Figura 3 Modelo de propagación de las ondas S**



**Fuente. Anderson et al, 2003**

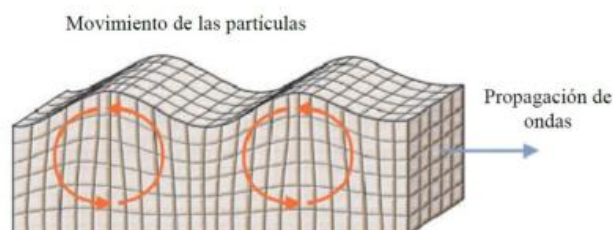
#### 4.2.1.2 Ondas sísmicas de superficie

Las ondas superficiales son análogas a las ondas de agua y viajan sobre la superficie de la Tierra. Se desplazan a menor velocidad que las ondas de cuerpo. Debido a su baja frecuencia provocan resonancia en edificios con mayor facilidad que las ondas de cuerpo y son por ende las ondas sísmicas más destructivas. Existen dos tipos de ondas superficiales: ondas Rayleigh y ondas Love. (López, 2016)

- **Ondas Rayleigh**

Las ondas Rayleigh son ondas superficiales, que producen un movimiento elíptico retrógrado del suelo, es asociada con una onda de agua (Ver Figura 4). La existencia de estas ondas fue predicha por John William Strutt en 1885. Son ondas más lentas que las ondas de cuerpo y su velocidad de propagación es casi un 90% de la velocidad de las ondas S. (López, 2016)

**Figura 4 Modelo de propagación de las ondas Rayleigh**

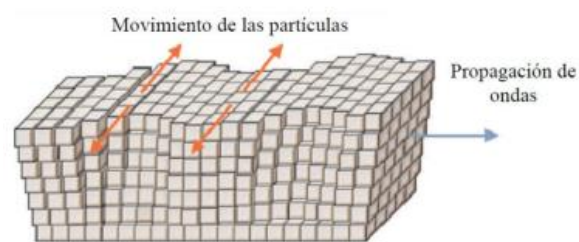


**Fuente. Anderson et al, 2003**

- **Ondas love**

Las ondas "Love" son ondas superficiales que provocan cortes horizontales en la tierra (Ver Figura 5). Fueron bautizadas por Augustus Edward Hough Love, un matemático británico que creó un modelo matemático de las ondas en 1911. La velocidad de las ondas Love es un 90% de la velocidad de las ondas S. (López, 2016)

*Figura 5 Modelo de propagación de las ondas Love*



*Fuente. Anderson et al, 2003*

### 3.2.2 Método de refracción sísmica

Dentro de los métodos sísmicos de mayor utilidad y longevidad se encuentra la refracción sísmica. Este método mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. Para esto se disponen una serie de sensores en línea recta a distancias conocidas, formando lo que se conoce como tendido sísmico o línea de refracción sísmica. A una distancia conocida del extremo del tendido, en el punto de disparo, se generan ondas sísmicas, con la ayuda de un martillo o por la detonación de explosivos, las cuales inducen vibraciones en el terreno que son detectadas por cada uno

de los sensores en el tendido. Para realizar este tipo de levantamiento es necesario lo siguiente; unidad de adquisición, en donde se almacenan los movimientos del terreno detectados, sensores de 4.5 y/o 14 Hz dependiendo el objetivo y cables de conexión entre los sensores y la unidad de adquisición, cable trigger, que se encarga de marcar el momento de inicio de registro en la unidad de adquisición. (López, 2016)

### **3.2.2.1 Aplicaciones en geotecnia**

La aplicación más común de la refracción sísmica en la Geotecnia es para la determinación de la profundidad a basamento en los proyectos de construcción de represas y grandes hidroeléctricas, y para la determinación de las condiciones (meteorización, fracturación) y competencia de la roca en donde se asentarán las estructuras, así como por donde se realizarán los túneles. También es muy útil para detección de fallas geológicas. En el caso de contextos urbanos la refracción resulta útil para la determinación de la profundidad a basamento y el perfil de velocidades de onda P y S; y para la extrapolación lateral de perforaciones puntuales de suelos. El método utiliza la llegada de las primeras ondas a los geófonos, ondas P, pero como también las llegadas de las ondas S, de tal manera que se pueden determinar la relación de Poisson y otros módulos dinámicos. (López, 2016)

### **3.2.2.2 Alcances y limitaciones del método**

En términos Geotécnicos, y el estudio dinámico de los suelos los alcances y limitaciones del método serían los siguientes:

- ❖ Alcances

- Detecta variaciones tanto en profundidad como en la horizontal de la velocidad de la onda P (y de la S).
- Permite la detección de la profundidad a basamento y de su relieve, dependiendo de variables como longitud del tendido, energía de la fuente sísmica, velocidades de los suelos.
- ❖ Limitaciones
  - Sólo funciona cuando la velocidad de propagación de las ondas aumenta con la profundidad. En el caso de suelos con capas intermedias de menor velocidad el método arrojaría resultados erróneos.
  - Para el caso de aplicaciones urbanas de la Ingeniería Civil, el Método de Refracción Sísmica está limitado por la disponibilidad de zonas descubiertas con suficiente extensión. La longitud del tendido en superficie está directamente relacionada con el alcance de la exploración en profundidad.

### **3.2.2.3 Propagación y trayectoria de las ondas**

Cuando se generan ondas sísmicas, a partir de golpes en el suelo con un martillo, o con explosiones de pólvora, éstas incluyen tanto, ondas sísmicas internas, primarias y secundarias, como superficiales ondas Love y Rayleigh. Las ondas P, también conocidas como ondas longitudinales, son las de mayor interés en la refracción sísmica. Las leyes que rigen la propagación y la trayectoria de las ondas sísmicas en la refracción, son las mismas que se utilizan en óptica: (López, 2016)

- Principio de Huygens.
- Principio de Fermat, y

- Ley de refracción (o de Snell)

### **3.2.3 Método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)**

El método MASW o Análisis Multicanal de Ondas Superficiales es un método sísmico que permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman. Este método consiste en la interpretación de las ondas superficiales (Ondas Rayleigh u Ondas R) de un registro en arreglo multicanal, generada por una fuente de energía impulsiva sobre la superficie a una distancia predeterminada de la línea de estudio, obteniéndose el perfil de velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) para el punto central de dicha línea. La interpretación de los registros consiste en obtener de ellos una curva de dispersión (un gráfico de la velocidad de fase de las ondas superficiales versus la frecuencia), filtrándose solamente las ondas superficiales ya que su velocidad de fase se aproxima en un 90 a 95% del valor de la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), y mediante un cálculo inverso iterativo (método de inversión) se obtiene el perfil unidimensional  $V_s$  a partir de la curva de dispersión calculada. Este método se ha venido utilizando con bastante frecuencia en las investigaciones geotécnicas para la cimentación de obras civiles (carreteras, puentes, túneles, etc.), presas de tierra, presas de relaves, Pads de lixiviación, etc. obteniéndose buenas correlaciones con los perfiles estratigráficos del suelo en los casos donde se han realizado perforaciones diamantinas, así como con los resultados de Ensayos de Penetración Estándar (SPT), por lo que tiene una buena

confiabilidad y constituye una alternativa muy económica para la evaluación de los parámetros dinámicos del suelo de fundación. (López, 2016)

### **3.2.4 Método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)**

Este método permite producir modelos unidimensionales que corresponden a puntos discretos en la superficie. Existen otras técnicas geofísicas eléctricas o electromagnéticas que miden la resistividad de los materiales, o en algún caso su inverso la conductividad. Algunas de estas técnicas son mucho más modernas y más precisas que los sondeos eléctricos verticales (SEV), pero estos se siguen utilizando, por su sencillez y la relativa economía del equipo necesario. (Arias, 2011)

La Técnica de sondeo eléctrico vertical, consta de un arreglo de electrodos en los cuales se le propina una descarga, obteniendo en el centro del arreglo un sondeo de la composición estratigráfico en función de las resistividades presentes en el terreno, por tanto, la profundidad de exploración se incrementa conforme aumenta la distancia entre los electrodos y durante un sondeo se conoce la variación de la resistividad con la profundidad. El principio físico de la resistividad eléctrica, es la base para esta técnica geoelectrica definiendo que, a partir de un cubo eléctricamente homogéneo, de lado (L) a través del cual pasa una corriente(I). El material dentro del cubo resiste el paso de la corriente eléctrica a través de él, resultando así en una caída de potencial (V) entre sus caras opuestas. La resistencia es proporcional a la longitud (L) del material resistivo e inversamente proporcional al área. La constante de proporcionalidad es la resistividad

verdadera que se denota con el símbolo ( $\rho$ ). De aquí se tiene que la resistencia a través de un volumen unitario está dada por la ecuación 4: (Arias, 2011).

$$\mathbf{R} = \frac{\rho}{L}$$

*Ecuación 1.*

**R** – Resistencia eléctrica

**$\rho$**  – Resistividad verdadera

**L** – Longitud

Conforme a la ley Ohm la resistencia también se puede definir en términos del potencial y corriente.

$$\mathbf{R} = \frac{V}{I}$$

*Ecuación 2.*

**R** – Resistencia eléctrica

**V** – Potencial eléctrico

**I** – Corriente eléctrica

Combinando las ecuaciones tres y cuatro se obtiene la expresión de resistividad cuyas unidades son Ohm-metro ( $\Omega$ -m), su inversa es la conductividad ( $\sigma$ ) que tiene como unidades siemens/metro (S/m) que equivalen a Ohm/metro ( $\Omega$ /m).

$$\rho = V \left( \frac{L}{I} \right)$$

*Ecuación 3.*

**$\rho$**  – Resistividad eléctrica

**V** – Potencial eléctrico

**L** – Longitud

**I** – Corriente eléctrica



La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectoros AB. Si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad, pero su densidad disminuye. Para un medio isótropo y homogéneo. Sin embargo, no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), ya que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual, y es proporcional a AB, siendo esto, válido para un subsuelo homogéneo. (Arias, 2011)

### **3.2.5 Exploración del subsuelo**

La geotecnia es la rama de la Ingeniería Civil que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes de la tierra. Esta se divide en el estudio de parámetros o propiedades relacionadas a la mecánica de suelos, mecánica de rocas y dinámica de suelos. La geotecnia realiza dos tipos de ensayos: ensayos de campo y ensayo de laboratorio.

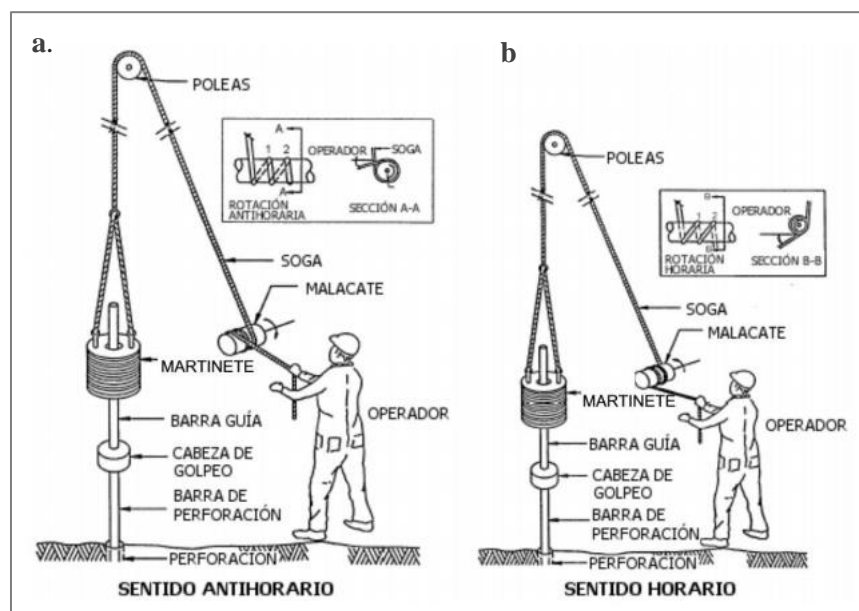
- **Ensayo de campo:** Se lleva a cabo para determinar las pruebas geomecánicas, en cuyo caso debe realizarse con equipos que siempre debe estar calibrados.
- **Ensayo de laboratorio:** permiten realizar la caracterización y clasificación de los suelos; se debe tener en cuenta: la selección de muestras, el tipo y número de ensayos, una caracterización geomecánica detallada. (NSR-10)

#### **3.2.5.1 Ensayo de penetración estándar (SPT)**

Este método describe el procedimiento para conducir un muestreador de tubo partido dentro del suelo para obtener muestras alteradas representativas con fines de

identificación, y medir la resistencia del suelo a la penetración del muestreador, conocido como Ensayo de Penetración Normal (Standard Penetration Test – SPT), ver figura 6.

**Figura 6 Esquema general del equipo para el ensayo de penetración estándar (SPT), sistema de soga: A. sentido antihorario, B. sentido horario.**



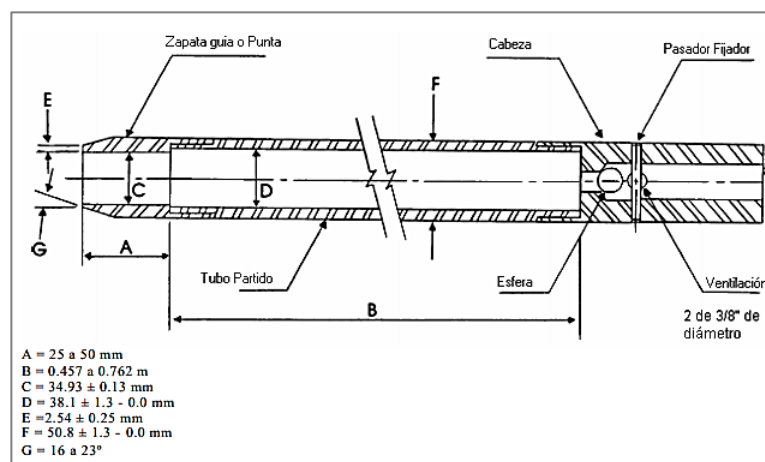
**Fuente. López, 2003**

Se debe hincar un tubo partido, de dimensiones 3.5 cm de diámetro inicial, 3.81 cm de diámetro medio y 66 cm de largo, este debe ser golpeado directamente por un martillo cuyo peso es de 140 lb (63.503 kg), ver figura 3; se debe utilizar una guía que permita la caída libre desde una distancia de 30" (0.76 metros) se marca el tubo con tres incrementos sucesivos de 6" (0.15m), para observar el avance del muestreador bajo el impacto del martillo, se cuentan el número de golpes aplicados para cada incremento, cada vez que se saca el muestreador a la superficie y se abre se debe registrar el porcentaje de muestra recuperada, se le hace una descripción, se almacena la muestra en

recipientes sellados para disminuir la pérdida de humedad del suelo, se etiqueta con nombre del proyecto, número de perforación, profundidad de la muestra y el número de golpes por cada 6"; se debe proteger la muestra de los cambios bruscos de temperatura.

(INV E-111)

**Figura 7 Muestreador de tubo partido**



**Fuente. INV E-111-07**

Este ensayo es muy utilizado en proyectos de exploración geotécnica, por ello existen correlaciones respecto al número de golpes (N), que permiten correlacionar los parámetros elásticos y de esfuerzo presentes en el suelo, utilizando la ecuación 1.

$$N_{60} = N \frac{ER}{60\%(475)} (C_{ER})(C_B)(C_S)(C_R)$$

*Ecuación 4.*

$N_{60}$  – Número de golpes corregidos al 60%.

$ER$  – Energía de impacto.

$(C_{ER})$  – Corrección por martillo.

$(C_B)$  – Corrección por diámetro.

$(C_S)$  – Corrección por muestreo.

$(C_R)$  – Corrección por longitud de barra.

Teniendo en cuenta las correcciones que se le hace al ensayo, debido a la difícil operatividad de este ensayo como se muestra en la tabla.2.

**Tabla 2 Coeficientes de corrección SPT**

Factor	Variables de equipo	Corrección	
		Termino	Valor
Relación de energía	Martillo de seguridad	$C_{ER}$	0.9
	Golpe de martillo		0.75
Diámetro de pozo	65 a 115 mm (2.5 a 4.5 in)	$C_B$	1
	150 mm (6 in)		1.05
	200 mm (8 in)		1.15
Método de muestreo	Muestreado estándar	$C_S$	1
	Muestreado sin revestimiento		1.2
Longitud de la barra	> 10 m (>30 ft)	$C_R$	1
	6 a 10 m (20 a 30 ft)		0.95
	4 a 6 m (13 a 20 ft)		0.85
	3 a 4 m (10 a 13 ft)		0.75

*Fuente. Skempton. 1986*

### 3.2.5.2 Análisis de laboratorio

Con la muestra obtenida del ensayo de penetración estándar (SPT), se hace un análisis de laboratorio en el cual se realizan ensayos de granulometría, límites de Atterberg, con el objetivo de clasificar y caracterizar el suelo.

➤ **Contenido de humedad:** Se determina la masa del recipiente limpio y seco, se toma una muestra representativa y se deposita en el recipiente para determinar el peso del

recipiente con el material, se lleva al horno a una temperatura de 230°F por 12 a 16 horas, (ver figura 8) pasado este tiempo se retira del horno, se pesa nuevamente y se procede a calcular, ver ecuación 5.

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} * 100$$

*Ecuación 5.*

$w$  – Contenido de agua, %.

$W_1$  – Masa del recipiente con el espécimen húmedo, g.

$W_2$  – Masa del recipiente con el espécimen seco, g.

$W_c$ : Masa del recipiente, g. (INV E-122-07)

***Figura 8 Ensayo contenido de humedad***



***Fuente. Autores***

➤ **Granulometría:** “Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente. Este método también se puede aplicar usando mallas de laboratorio de abertura redonda, y no se empleará para agregados recuperados de mezclas asfálticas”. (INV E-213-07), ver figura 9

**Figura 9** Ensayo de granulometría, a. pesado de la muestra, b. lavado de la muestra, c. tamizado de la muestra, d. material retenido en cada tamiz.

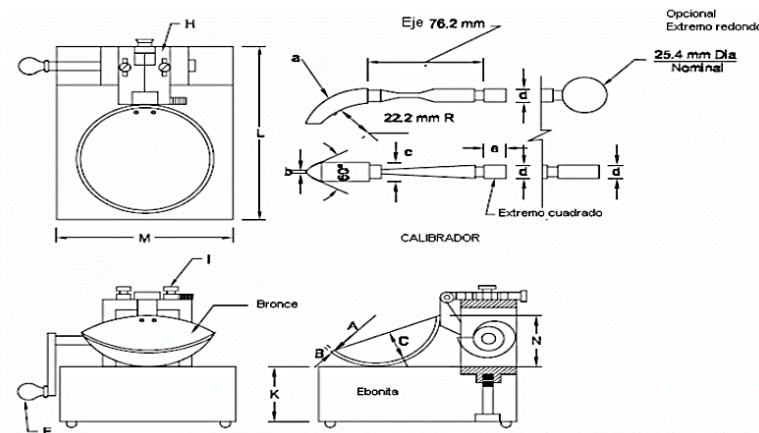


**Fuente. Autores**

➤ **Límites de Atterberg**

- **Limite líquido (LL-WL):** contenido de humedad del suelo, expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados líquido y plástico. El equipo utilizado para realizar este ensayo es una cazuela de bronce, suspendida de un soporte para controlar la caída sobre la superficie de un bloque de material resiliente, que sirve como base del aparato. (INV E-125,2013), ver figuras 10 y 11.

**Figura 10 Cazuela de Casagrande**



**Fuente. INV E-125**

- Límite plástico (LP-Wp):** Contenido de agua del suelo, expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados plástico y semisólido. Se determina presionando de manera repetida una pequeña porción de suelo húmedo, de manera de formar rollos de 3.2 mm (1/8”) de diámetro, hasta que su contenido de agua se reduce a un punto en el cual se produce el agrietamiento y/o desmoronamiento de los rollos. El límite plástico es la humedad más baja con la cual se pueden formar rollos de suelo de este diámetro, sin que ellos se agrieten o se desmoronen. (INV E-126,2013), ver figura 11.

- Índice de plasticidad (IP):** Rango de contenidos de agua, dentro del cual un suelo se comporta plásticamente. Numéricamente es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, ver ecuación 6. (INV E-126,2013)

$$IP = LL - LP$$

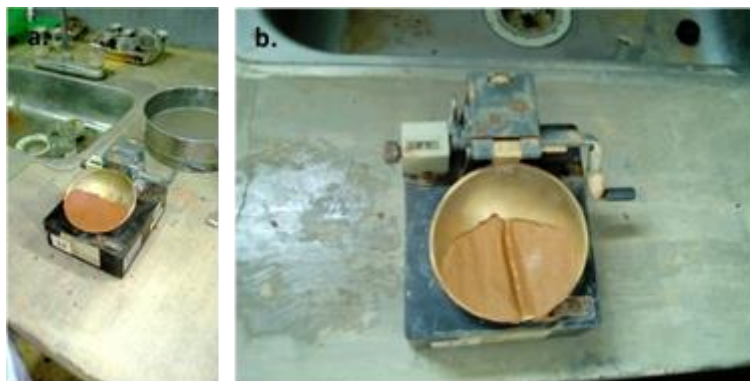
*Ecuación 6.*

*IP* – Índice de Plasticidad

*LL* – Límite líquido

*LP* – Límite Plástico.

*Figura 11 Límites de Atterberg, a y b. determinación del límite líquido..*



*Fuente. Autores*



## **4. Metodología**

Este trabajo se realizó en tres (3) etapas:

### **4.1 Primera etapa de campo**

Se realizó el levantamiento de dos (2) líneas sísmicas, en las cuales, se hizo un levantamiento topográfico, doce (12) sondeos eléctricos verticales (SEV), para adquirir los datos de tomografía de refracción sísmica (TRS) y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D y 2D) se hizo un tendido de dos (2) líneas de 80.5 metros de longitud; para el área de geotecnia se realizaron dos (2) ensayos de penetración estándar (SPT) alcanzando una profundidad máxima de 3.66 metros,

#### **4.1.1 Levantamiento topográfico**

Se hizo un levantamiento topográfico utilizando el equipo topográfico RTK GNSS (Stonex S800) (ver figura 12), en el cual se tomaron las elevaciones del punto inicial y el punto final de las dos líneas trabajadas, conociendo las condiciones del terreno y adquiriendo el perfil de las líneas se determinó la separación de los geófonos lo cual permite obtener un buen modelo de adquisición.

**Figura 12** Equipo topográfico RTK Stonex S800 GNSS, *a. estación base; b. estación móvil.*



**Fuente. Autores**

### **5.1.2 Sondeo eléctrico vertical (SEV)**

Para realizar este método se hincaron electrodos en la superficie del terreno teniendo en cuenta el arreglo dispuesto ya que es fácil de manejar. El equipo utilizado para la adquisición de datos fue el GeoAmp, cuatro (4) electrodos de 50 cm de longitud, cuatro (4) cables conectores de 100 m de longitud cada uno, computador con software de adquisición (PowerDat) (ver figura 13).

**Figura 13 Equipo geoelectrica (GeoAmp)**



**Fuente. Autores**

### **5.1.3 Tomografía de refracción sísmica (TRS)**

El equipo utilizado para adquirir los datos fue, un sismógrafo Geode de 24 canales marca Geometrics, geófonos con frecuencia de 14 Hz, trigger, placa metálica, martillo, batería de 12 voltios, cable multipolar, computador con software (seislmanger) (ver figura 14). Este ensayo se realiza en dos (2) líneas de 80.5m de longitud, en las cuales se instalan los geófonos con una separación de 3.5 m respectivamente (ver figura 15a), se utilizó como fuente un martillo de 14 lb, se inicia a golpear a -7 m, a -3.5m, a 22.75m, a 40.25m, a 57.75m, a 80.5m, a 84m, a 87.5m; se toman 3 mediciones por cada impacto lo que ayuda a crear un perfil y un contra perfil permitiendo identificar los primeros arribos de la onda.

### **5.1.4 Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)**

Este método es utilizado para determinar las ondas de secundarias o las ondas de

corte ( $V_s$ ), permite evaluar las condiciones elásticas del suelo para fines ingenieriles; el equipo utilizado en este ensayo consta de un sismógrafo, geófonos, sensor inercial, martillo, placa metálica, cable (ver figura 14). Se usaron 24 sensores con frecuencia de 4.5 Hz, en la línea de 80.5 m con separación de 3.5m entre sí. Después de conectar el canal de registro se golpeó con el martillo de 14lb fuera de la línea a 16.1m y a 8.05m a ambos extremos, este método es conocido como MASW 1D (ver figura 15b)

***Figura 14 Equipo de MASW***

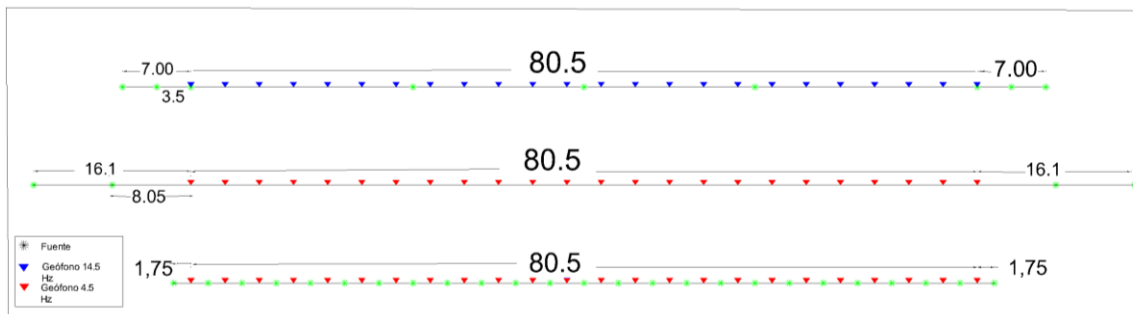


***Fuente. Autores***

Existe otro método llamado MASW 2D (ver figura 15c) este presenta un análisis en dos dimensiones (largo y profundidad) contra las velocidades de propagación de la onda S, se asumen las mismas condiciones que se utilizaron en el método MASW 1D, con la excepción de que los golpes se realizan dentro de la línea en el intermedio de cada geófono.

**Figura 15 Geometría de adquisición de datos sísmicos, a. TRS, b. MASW 1D, c.**

**MASW 2D**

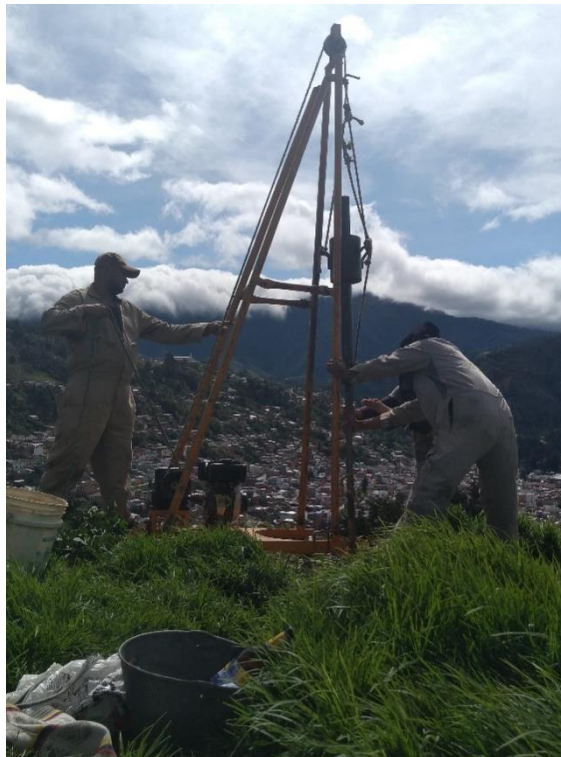


**Fuente. Autores**

### 5.1.5 Ensayo de penetración estándar (SPT)

Este método permite la recolección de una muestra de suelo para realizar los respectivos ensayos de laboratorio a partir de un muestreo (ver figura 7), este ensayo consta de tubo partido que va conectado a una tubería de perforación, se introduce dentro de un hueco, dejándola caer suavemente, evitando introducir material de las paredes de la perforación, se marcan incrementos sucesivos de 0.15 m (6"), se deben contar el número de golpes aplicados para cada incremento de 0.15 m, al sacar el muestreador se debe registrar la longitud de la muestra recuperada, se hace la descripción, se etiqueta y se almacena la muestra. (ver figura 16).

*Figura 16 Equipo de ensayo de penetración estándar (SPT)*



*Fuente. Autores*

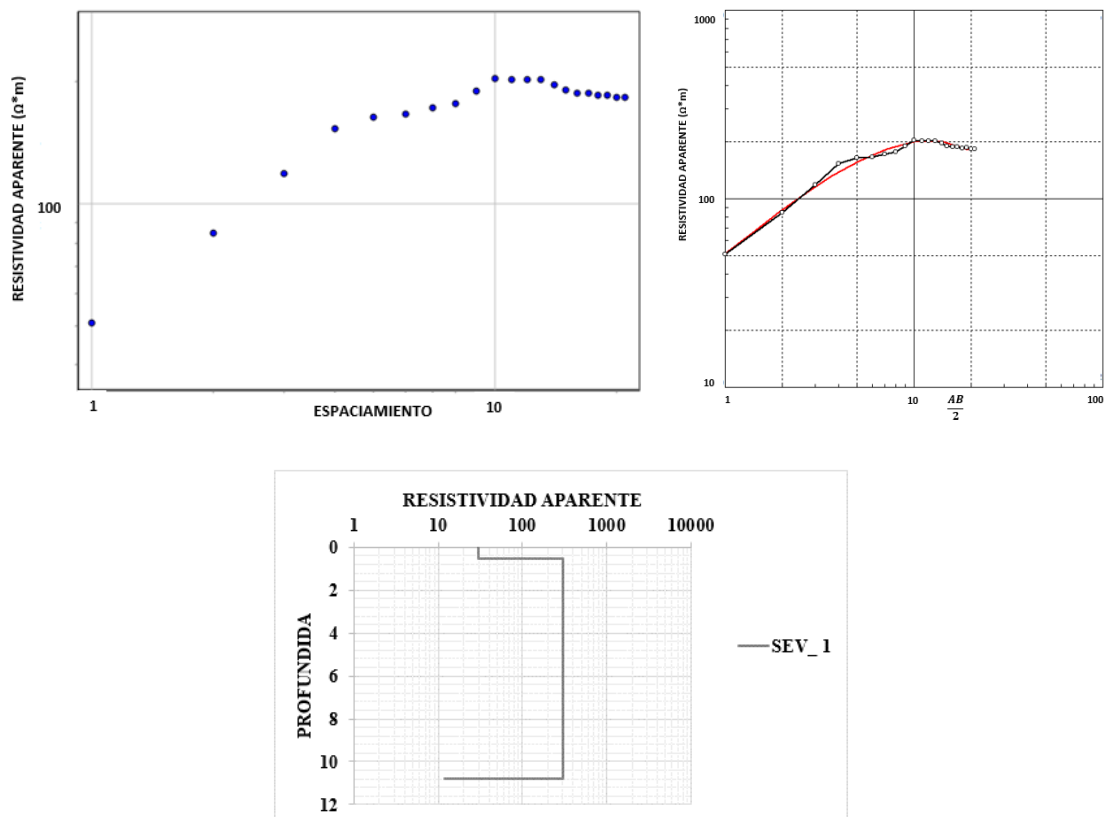
## **5.2 Segunda etapa de procesamiento de datos**

Se realiza el procesamiento de los datos que fueron adquiridos en campo.

### **5.2.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV)**

El procesamiento de estos datos se realizó mediante el software IPI2win, este programa arroja graficas en una dimensión de las curvas de SEV, permite relacionar la resistividad aparente en función de la separación de electrodos (ver figura 17b); con el fin de determinar el espesor de los estratos y sus resistividades (ver figura 17c), con dichas resistividades se correlaciona con algunas propiedades de los suelos.

**Figura 17** Procesamiento sondeo eléctrico vertical, a) *Dispersión de las resistividades en función del espaciamento*, b) *curva de resistividad aparente Vs AB/2*, c) *profundidad de las capas respecto a la resistividad*



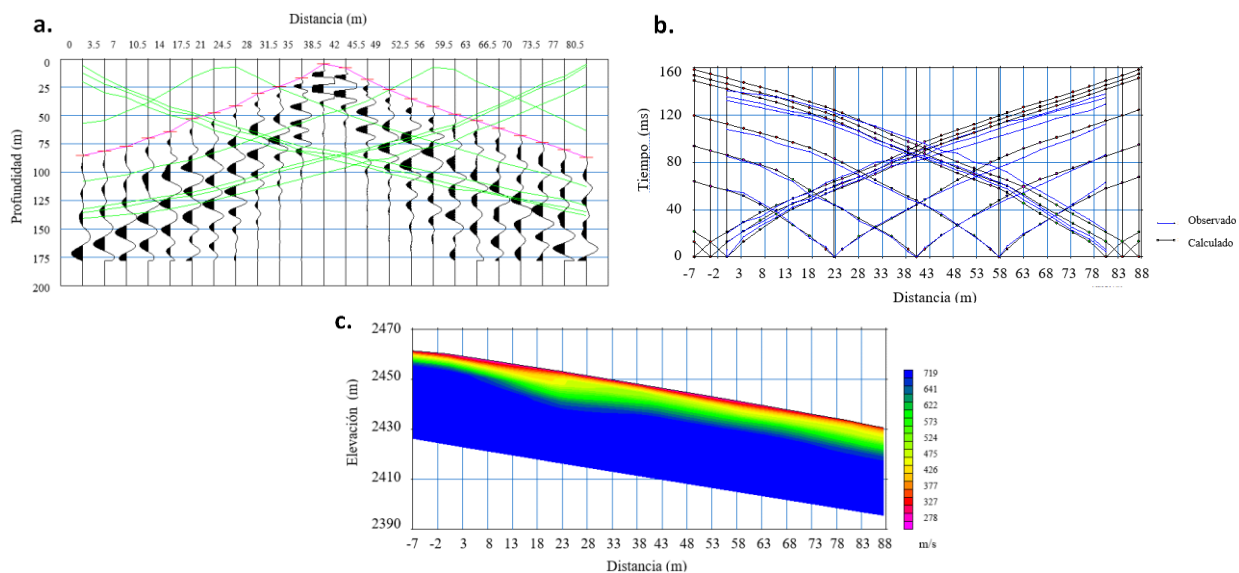
*Fuente. Autores*

### 5.2.2 Tomografía de refracción sísmica (TRS)

Los softwares utilizados son Plotrefa y Pickwin, como primer paso se usará Pickwin (Pick Firts Break sor Dispersion Curves). El cual permite observar la llegada de

los primeros arribos de las ondas refractadas (ver Figura 18a), e identificar el tren de ondas superficiales, seguidamente se utilizó Plotrefa (Refraction Analysis) en donde se realizó la selección de capas teniendo en cuenta el cambio de pendiente ver Figura 18b, se genera un modelo inicial, partiendo de los frentes de velocidades estimado por medio de métodos matemáticos como lo son mínimos cuadrados (ver figura 18c), se hace una corrección la cual se observa el error presentado con la finalidad de obtener un modelo final con mayor precisión a partir de la inversión por tomografía.

**Figura 18** *Procesamiento de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS). a) Picado de los primeros arribos de la onda refractada. b) Selección de capas. c) Modelo final a partir de la inversión por tomografía*



*Fuente. Autores*



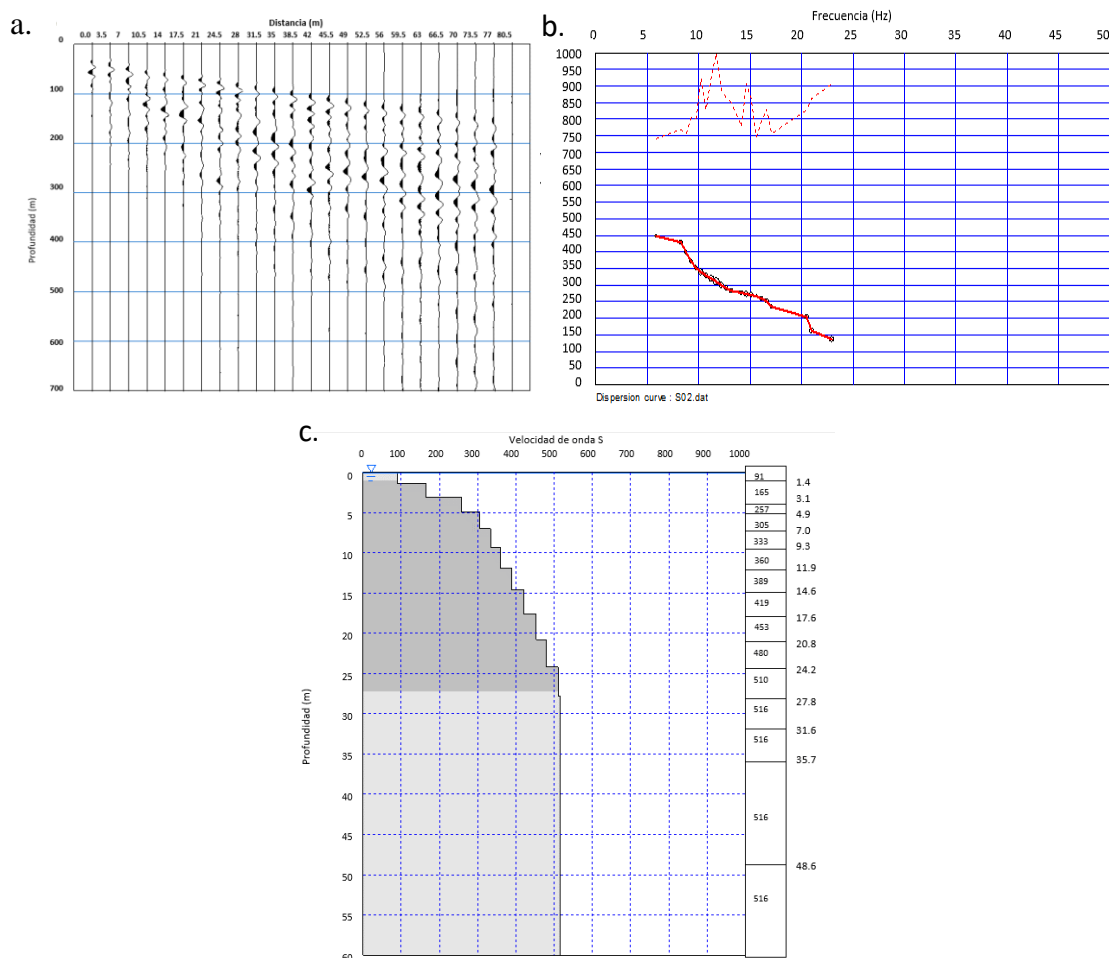
### **5.2.3 Análisis multicanal de ondas superficiales MASW**

#### **5.2.3.1 MASW 1D**

Se realizó mediante el software Surface Wave Analysis Wizard, se cargan los datos sísmicos obtenidos (ver figura 19a) se hace un filtrado de estos datos con el fin de disminuir el error; después se procede a picar los primeros arribos para generar la curva de dispersión (ver figura 19b), se genera un modelo inicial (ver figura 19c) y finalmente se genera el modelo final donde se utiliza una inversión de proceso iterativo. Allí se puede observar la velocidad de onda y la profundidad estimada en el centro de la línea.

**Figura 19** Procesamiento de Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D).

a) Registro de las ondas superficiales, b) Curva de dispersión, c) Modelo inicial.



*Fuente. Autores*

### 5.2.3.2 MASW 2D

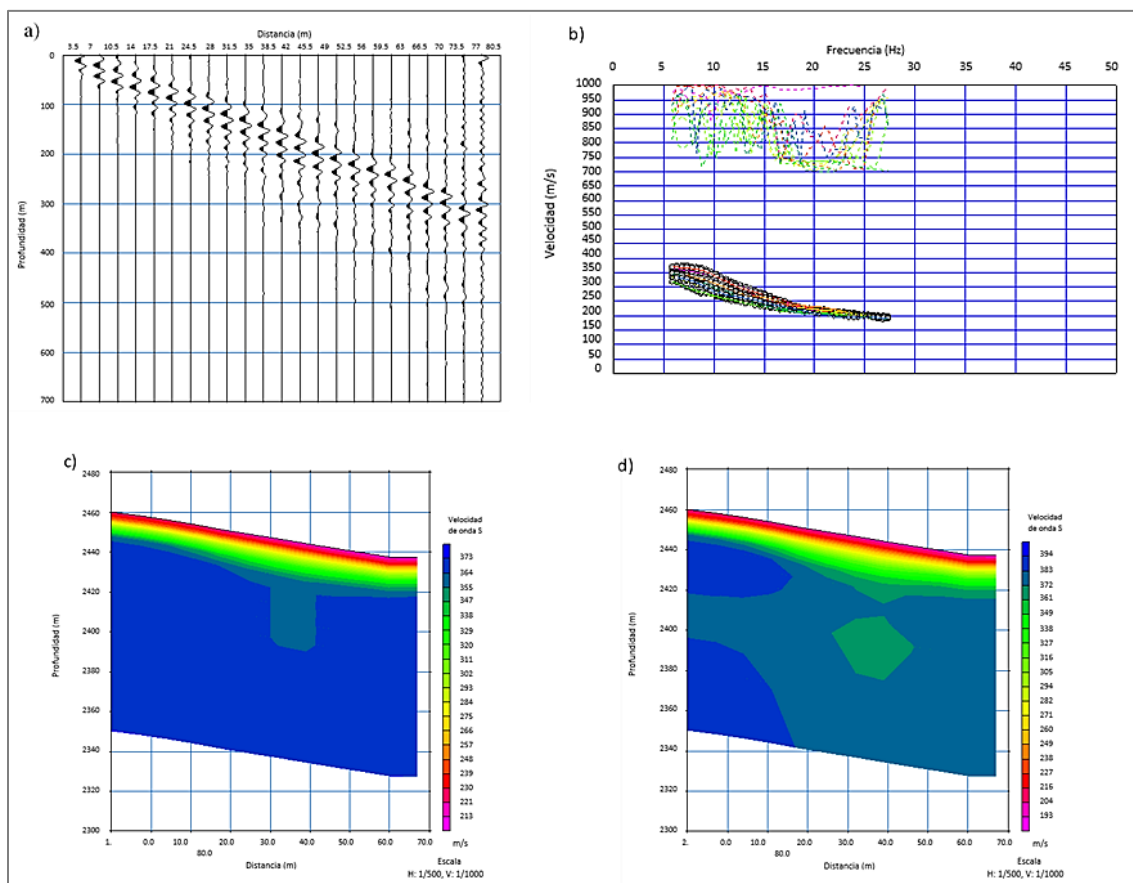
Se utiliza el software Surface Wave Analysis Wizard, para realizar un análisis en dos dimensiones (profundidad y largo), contra las velocidades de propagación de la onda S, se crea la lista de datos y hace un filtrado, arroja una gráfica en donde se observa la geometría de adquisición del modelo, estos datos se encuentran en CMP (ver grafica

20a), se hace la transformada de Fourier, la cual arroja una curva de dispersión, se eliminan los datos de alto modo y baja frecuencia (ver grafica 20b), se genera un modelo inicial en donde se observa los espesores de cada una de las capas, la profundidad, las velocidades aparentes (ver grafica 20c), por último se genera el modelo final en dos dimensiones con sus respectivas velocidades encontradas a lo largo de la línea.

**Figura 20 Procesamiento de Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 2D).**

**a) Registro del tren de ondas superficiales, b) Curva de dispersión, c) Modelo inicial, d)**

**Modelo final.**



**Fuente. Autores**

#### 5.2.4 Ensayo de penetración estándar (SPT de sus siglas en ingles)

El software utilizado (Novo SPT), en el cual se analiza el número de golpes en el ensayo SPT, hace las respectivas correcciones (ver tabla 3) y se correlaciona la relación de energía para obtener los diferentes parámetros del suelo como: ángulo de fricción interno, módulo de corte, módulo de Young, peso específico. Se utilizo la base de datos del software para la deducción de dichos parámetros, empleando varios autores con el fin de obtener datos más precisos.

*Tabla 3. Correcciones del ensayo SPT, perforación 1*

<b>Perforación 1</b>						
<b>N° de muestra</b>	<b># de golpes</b>	<b>C<sub>ER</sub></b>	<b>C<sub>B</sub></b>	<b>C<sub>S</sub></b>	<b>C<sub>R</sub></b>	<b>N<sub>(60)</sub></b>
Muestra 1	10	0.75	1	1	0.75	10
	10	0.75	1	1	0.75	10
Muestra 2	12	0.75	1	1	0.75	12
	9	0.75	1	1	0.75	9
	15	0.75	1	1	0.75	13

*Fuente. Autores*

#### 5.3 Tercera etapa de análisis e interpretación de datos

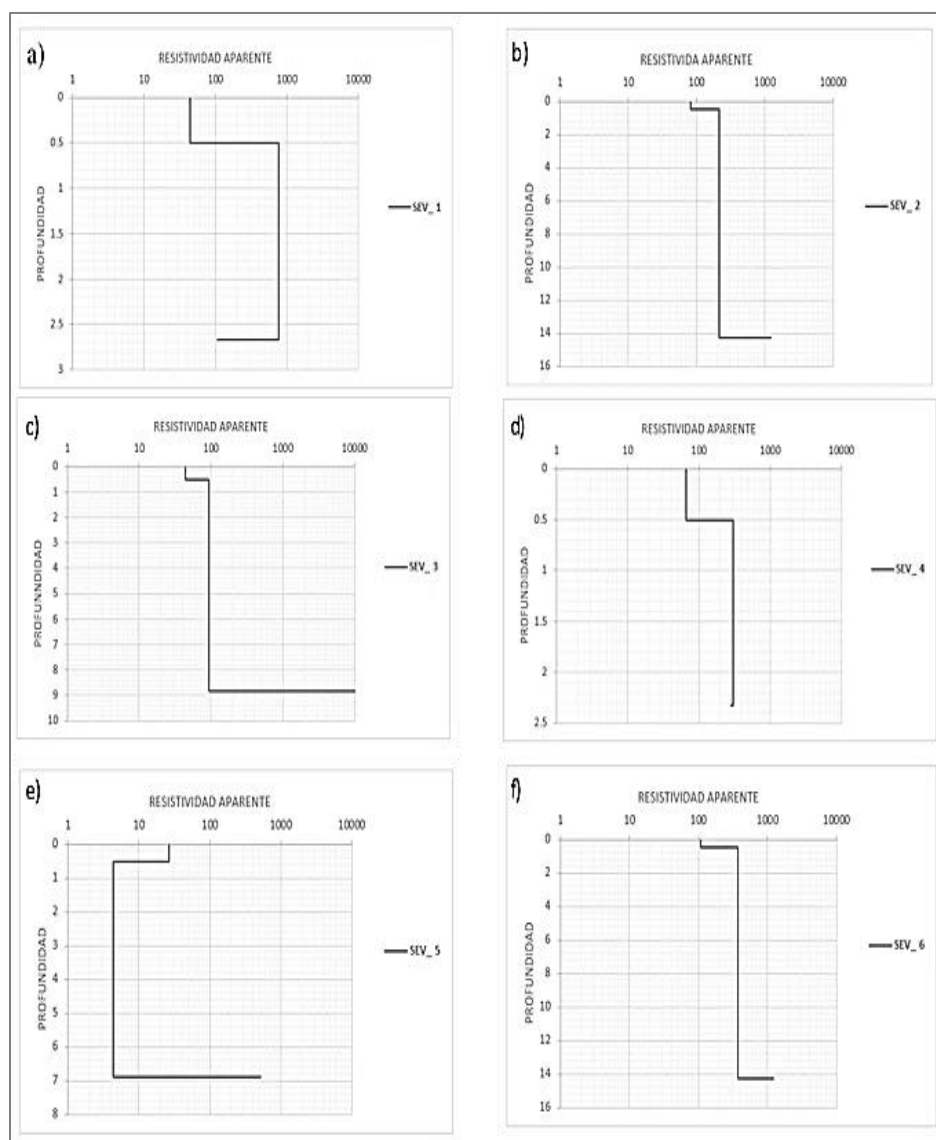
Esta etapa se muestra en el capítulo 4, en el cual se tienen en cuenta los datos procesados en la fase anterior se hace la correlación de los datos geofísicos y los geotécnicos para finalmente realizar la caracterización y clasificación del subsuelo del área de estudio.

## 7.3 Capítulo 4

### 7.4 6. Resultados

#### 6.1 Sondeo eléctrico vertical SEV

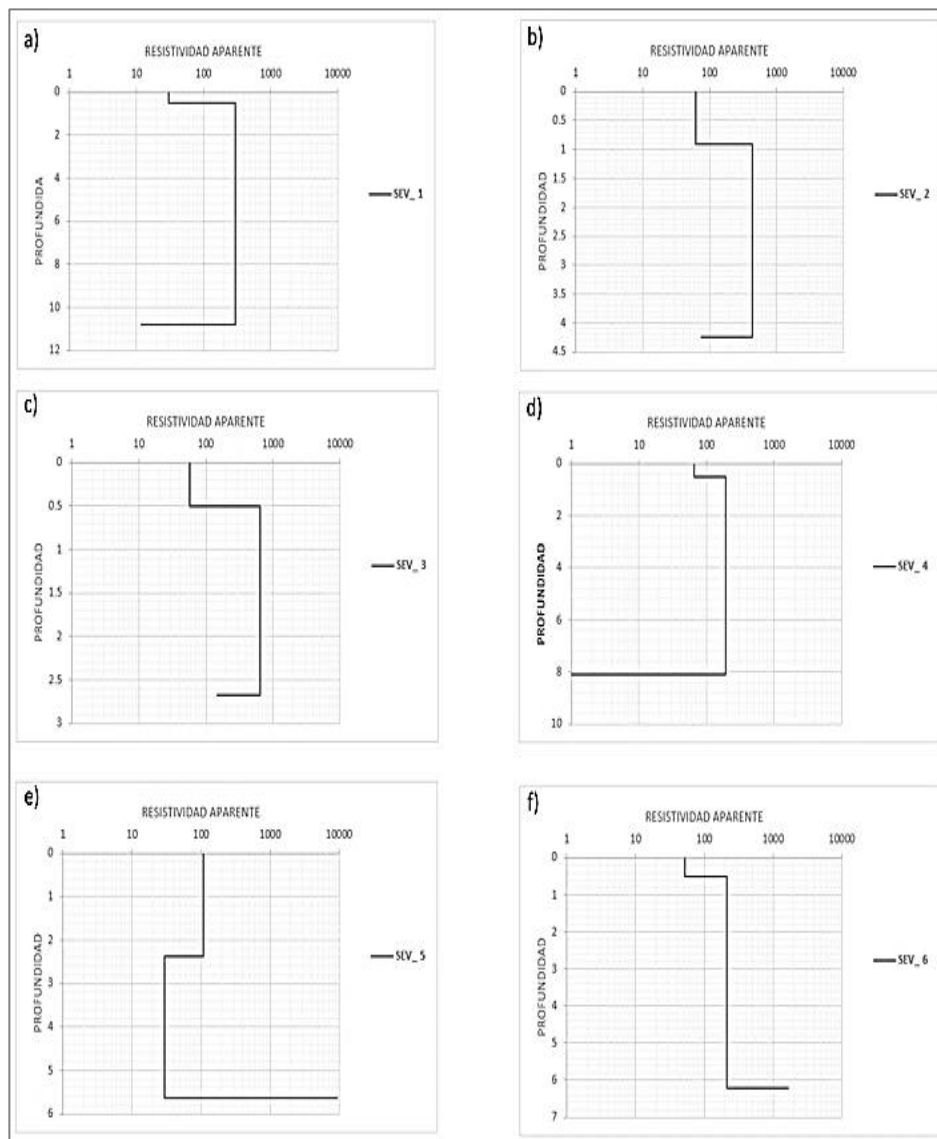
*Figura 21 Sondeo Eléctrico Vertical (línea 1)*



*Fuente. Autores*

De los datos procesados para SEV en la línea 1 y teniendo en cuenta la tabla de resistividad de los materiales se obtuvieron los siguientes resultados: SEV1: Hay presencia de materiales con resistividades de 44.4  $\Omega\text{m}$ , 769  $\Omega\text{m}$ , 107  $\Omega\text{m}$ . SEV2: Hay presencia de materiales con resistividades de 81.5  $\Omega\text{m}$ , 214  $\Omega\text{m}$ , 1217  $\Omega\text{m}$ . SEV3: Hay presencia de materiales con resistividades de 44.2  $\Omega\text{m}$ , 93.6  $\Omega\text{m}$ . SEV4: Hay presencia de materiales con resistividades de 65.4  $\Omega\text{m}$ , 304  $\Omega\text{m}$ , 279  $\Omega\text{m}$ . SEV5: Hay presencia de materiales con resistividades de 26.9  $\Omega\text{m}$ , 524  $\Omega\text{m}$ . SEV6: Hay presencia de materiales con resistividades de 107  $\Omega\text{m}$ , 370  $\Omega\text{m}$ , 1200  $\Omega\text{m}$ .

**Figura 22 Sondeo Eléctrico Vertical (línea 2)**



**Fuente. Autores**

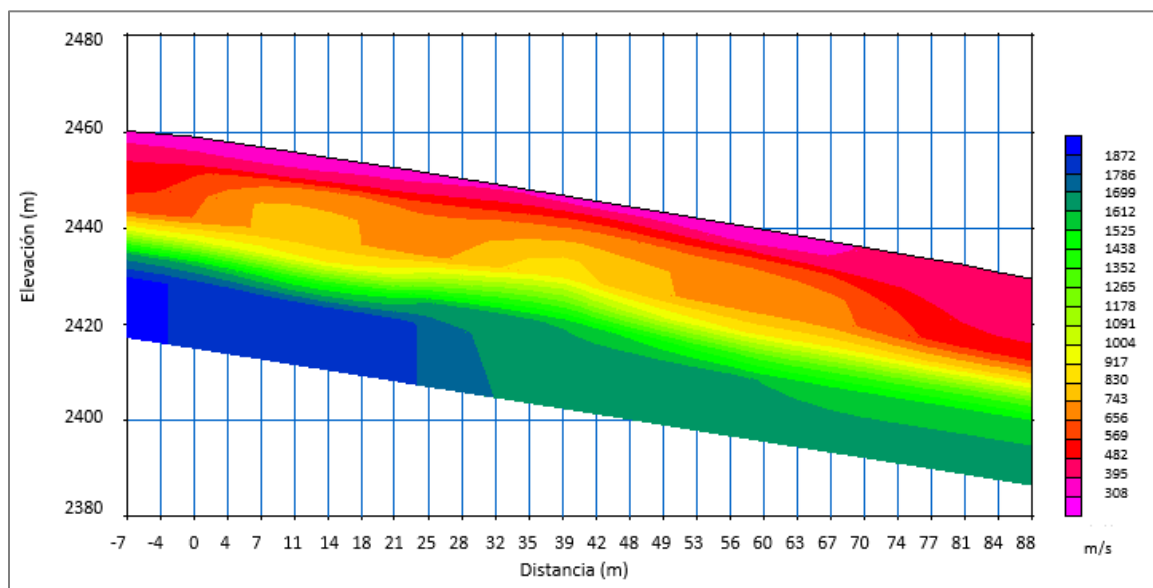
De los datos procesados para SEV en la línea 2: SEV1: Hay presencia de materiales con resistividades de 30 $\Omega\text{m}$ , 301  $\Omega\text{m}$ , 110.7 $\Omega\text{m}$ . SEV2: Hay presencia de materiales con resistividades de 62.6 $\Omega\text{m}$ , 442 $\Omega\text{m}$ , 76.6 $\Omega\text{m}$ . SEV3: Hay presencia de materiales con resistividades de 56.6  $\Omega\text{m}$ , 642  $\Omega\text{m}$ , 147  $\Omega\text{m}$ . SEV4: Hay presencia de

materiales con resistividades de 65.9  $\Omega\text{m}$ , 194 $\Omega\text{m}$ . SEV5: Hay presencia de materiales con resistividades de 109  $\Omega\text{m}$ , 29.5  $\Omega\text{m}$ , 9479  $\Omega\text{m}$ . SEV6: Hay presencia de materiales con resistividades de 52  $\Omega\text{m}$ , 215 $\Omega\text{m}$ , 1680  $\Omega\text{m}$ .

## 6.2 Tomografía de refracción sísmica TRS

Perfil sísmico de la línea 1: muestra la presencia de 3 capas: La capa 1 presenta valores de velocidad de onda p ( $V_p$ ) entre 278 m/s y 475 m/s con un espesor variable de 1.2 m a 2.7m. La capa 2 presenta valores de  $V_p$  entre 475 m/s y 719 m/s con un espesor variable de 2.5m a 9.5m. La capa 3 con velocidades mayores a 719 m/s como se muestra en la figura 25.

*Figura 23 Tomografía de Refracción Sísmica (línea 1)*

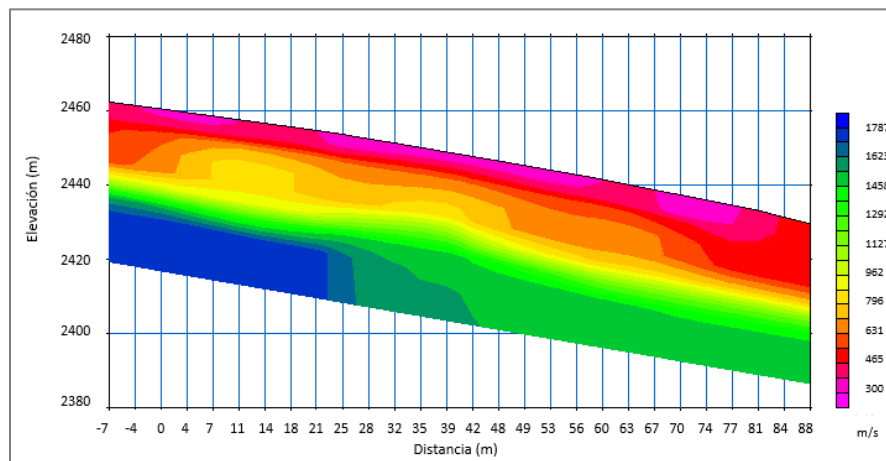


*Fuente. Autores*



Perfil sísmico de la línea 2: muestra la presencia de 3 capas: La capa 1: presenta valores de velocidad de onda p ( $V_p$ ) entre 266 m/s y 636 m/s con un espesor variable de 1.7 m a 4.3 m. La capa 2: presenta valores de  $V_p$  entre 636 m/s y 741m/s con un espesor variable de 5.7 m a 16 m. La capa 3: con velocidades mayores a 741 m/s como se muestra en la figura 27.

**Figura 24 Tomografía de Refracción Sísmica (línea 2)**



*Fuente. Autores*

### 6.3 Análisis multicanal de ondas superficiales MASW

#### 6.3.1 MASW 1D

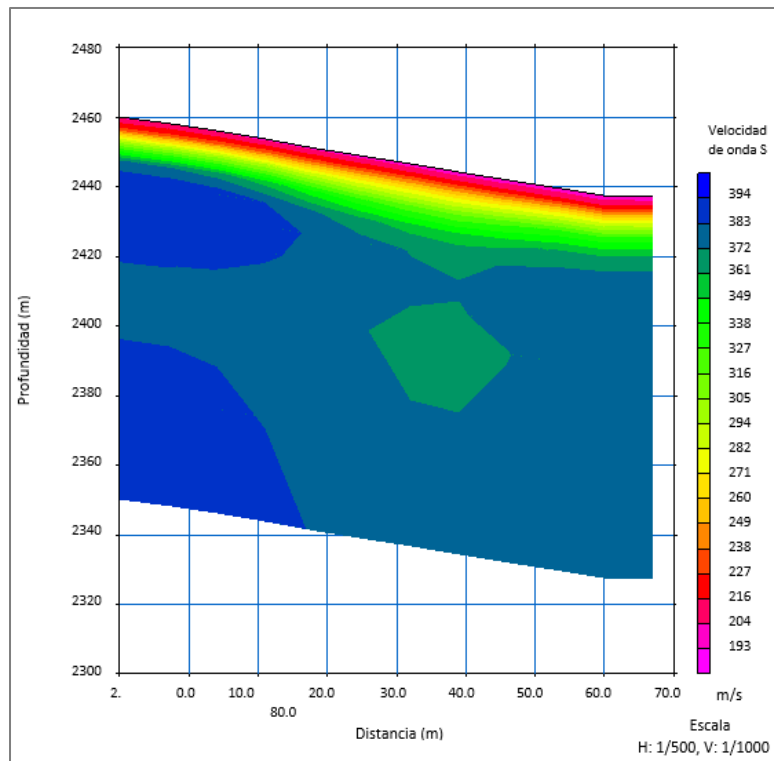
**Tabla 4. Velocidades de onda S MASW 1D**

		Velocidades de onda de corte (onda S) MASW 1D													
Línea 1	Profundidad	2.2	5	8.3	12.2	16.7	21.7	27.2	33.3	53.3					
	velocidad	252.8	230.0	272.8	329.0	378.3	435.0	510.8	510.3	510.0					
Línea 2	Profundidad	1.4	3.1	4.9	7	9.3	11.9	14.6	17.6	20.8	24.2	27.8	31.6	35.7	48.6
	velocidad	162.3	183.0	243.3	287.5	317.3	350.5	384.3	425.3	457.5	483.0	514.5	529.8	541.3	547.8

*Fuente. Autores*

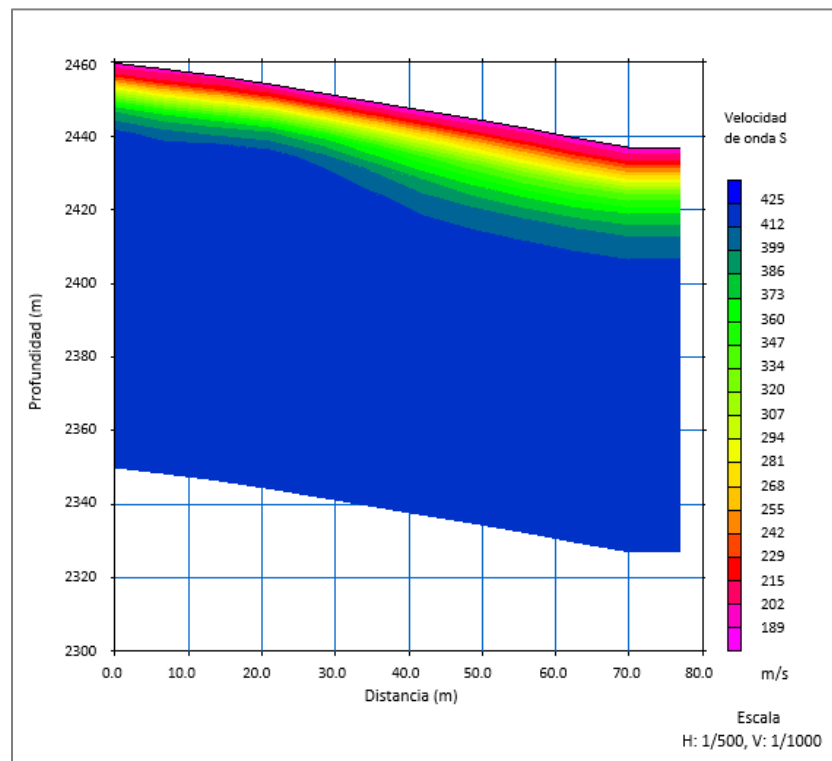
### 6.3.2 MASW 2D

*Figura 25 Análisis multicanal de ondas superficiales, MASW 2D (línea 1)*



*Fuente. Autores*

**Figura 26** Análisis multicanal de ondas superficiales, MASW 2D (línea 2)




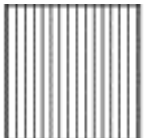
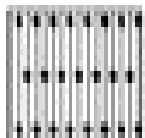
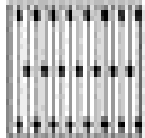
**Fuente. Autores**

#### 6.4 Ensayo de penetración estándar SPT

De la muestra recolectada en la fase de campo, se realizaron los laboratorios de contenido de humedad, granulometría, límites de Aterberg, se realizó una caracterización de suelo de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos SUCS (ver tablas 4, 5), en esta caracterización se observó la presencia de limos inorgánicos y arenas arcillosas; posteriormente se realizó una corrección de coeficientes para el ensayo de SPT; para esta investigación se utilizó un  $C_{ER} = 0.75$  que corresponde a golpe de martillo,  $C_B = 1$  que corresponde a un diámetro de pozo de 65 a 115 mm,  $C_S = 1$  ya que se usó un


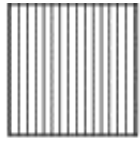
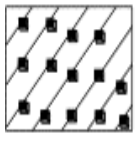
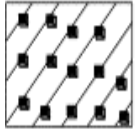
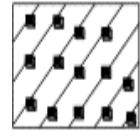
método de muestreo estándar,  $C_R = 0.75$  la longitud de la barra es de 3 a 4 mm, (ver tablas 3, 6); después de procesados los datos mediante el software NovoSPT se obtuvieron los parámetros estructurales fundamentale. (ver tabla 7)

**Tabla 5 Perfil estratigráfico SPT 1**

PERFIL ESTRATIGRAFICO SPT1						
ESPESOR	TIPO DE SUELO	w%	GRANULOMETRIA % que pasa T 200	LIMITES	CLASIFICACION SUCS	OBSERVACIONES
26c Cm					C.O	Capa Orgánica
40 Cm		21.95	58.07	WL= 34 WP= 25.1 IP= 8.86	ML	Limo Inorgánico, Limos arenosos o arcillosos
160 Cm		16.56	44.31	WL= 37 WP= 36 IP= 1.02	SM	Arenas limosas
140 Cm		18.16	47.83	WL= 43 WP= 41.1 IP= 1.95	SM	Arenas limosas

*Fuente. Autores*

**Tabla 6 Perfil estratigráfico SPT 2**

PERFIL ESTRATIGRAFICO SPT 2						
ESPESOR	TIPO DE SUELO	w%	GRANULOMETRIA % que pasa T 200	LIMITES	CLASIFICACION SUCS	OBSERVACIONES
50					C.O	Capa Orgánica
40 Cm		17.9 2	51.85	WL= 40 WP= 36.3 IP= 3.7	ML	Limo Inorgánico, Limos arenosos o arcillosos
96		19.0 5	3862	WL= 37 WP= 18.1 IP= 18.9	SC	Arenas arcillosas
120		16.5 6	47.49	WL= 35 WP= 26.9 IP= 8.09	SC	Arenas arcillosas
60		16.0 4	49.37	WL= 39 WP= 31.8 IP= 7.23	SC	Arenas arcillosas

*Fuente. Autores*

**Tabla 7 Correcciones del ensayo SPT, perforación 2**

<b>Perforación 2</b>						
<b>N° de muestra</b>	<b># de golpes</b>	<b>C<sub>ER</sub></b>	<b>C<sub>B</sub></b>	<b>C<sub>S</sub></b>	<b>C<sub>R</sub></b>	<b>N<sub>(60)</sub></b>
Muestra 1	6	0.75	1	1	0.75	5
	6	0.75	1	1	0.75	5
Muestra 2	9	0.75	1	1	0.75	9
	8	0.75	1	1	0.75	7
Muestra 3	11	0.75	1	1	0.75	10
	12	0.75	1	1	0.75	10
Muestra 4	12	0.75	1	1	0.75	9
	29	0.75	1	1	0.75	21

*Fuente. Autores***Tabla 8 Parámetros del suelo (Novo SPT)**

<b>SPT</b>	<b>Estrato</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Peso específico (Kn/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ángulo de fricción</b>	<b>Módulo de Young (Mpa)</b>
sondeo 1	1	0-0.91	17.52	32.10	4.47
	2	0.91-2.29.	17.61	32.20	9.07
	3	2.29-3.66	17.70	32.08	5.99
sondeo 2	1	0-0.91	16.98	29.58	3.40
	2	0.91-1.83.	17.52	30.58	4.05
	3	1.83-2.74	17.52	31.15	4.85
	4	2.74-3.66	17.91	32.98	7.28
sondeo 3	1	0-0.91	17.52	32.8	4.85
	2	0.91-1.37	16.98	29.85	3.67
	3	1.37-2.74	17.52	30.95	4.54
	4	2.74-3.66	17.80	32.45	6.33
	5	3.66-4.57	18.07	33.275	7.72

*Fuente. Autores*

## 7. Análisis de resultados

### 7.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV)

De los datos procesados para SEV y teniendo en cuenta la tabla de resistividad de los materiales se obtuvieron los siguientes resultados:

- Línea 1

SEV1: Hay presencia de materiales con resistividades de 44.4  $\Omega\text{m}$ , 769  $\Omega\text{m}$ , 107 interpretados como limo, arena arcillosa. SEV2: Hay presencia de materiales con resistividades de 81.5  $\Omega\text{m}$ , 214  $\Omega\text{m}$ , 1217  $\Omega\text{m}$  interpretados como limo, arena arcillosa, arena silíceas. SEV3: Hay presencia de materiales con resistividades de 44.2  $\Omega\text{m}$ , 93.6  $\Omega\text{m}$  interpretados como limo, arena arcillosa. SEV4: Hay presencia de materiales con resistividades de 65.4  $\Omega\text{m}$ , 304  $\Omega\text{m}$ , 279  $\Omega\text{m}$  interpretados como limo, arena arcillosa. SEV5: Hay presencia de materiales con resistividades de 26.9  $\Omega\text{m}$ , 524  $\Omega\text{m}$  interpretados como limo, basamento de roca fracturada. SEV6: Hay presencia de materiales con resistividades de 107  $\Omega\text{m}$ , 370  $\Omega\text{m}$ , 1200  $\Omega\text{m}$  interpretados como arena arcillosa, grava no saturada.

- Línea 2

SEV1: Hay presencia de materiales con resistividades de 30 $\Omega\text{m}$ , 301  $\Omega\text{m}$ , 110.7 $\Omega\text{m}$  interpretados como limo, arena arcillosa. SEV2: Hay presencia de materiales con resistividades de 62.6 $\Omega\text{m}$ , 442 $\Omega\text{m}$ , 76.6 $\Omega\text{m}$  interpretados como limo, arena arcillosa. SEV3: Hay presencia de materiales con resistividades de 56.6  $\Omega\text{m}$ , 642  $\Omega\text{m}$ , 147  $\Omega\text{m}$ , interpretados como limo, arena silíceas, arena arcillosa. SEV4: Hay presencia de materiales con resistividades de 65.9  $\Omega\text{m}$ , 194 $\Omega\text{m}$ , interpretados como limo, arena

arcillosa. SEV5: Hay presencia de materiales con resistividades de 109  $\Omega\text{m}$ , 29.5  $\Omega\text{m}$ , 9479  $\Omega\text{m}$  interpretados como arena arcillosa, limo. SEV6: Hay presencia de materiales con resistividades de 52  $\Omega\text{m}$ , 215  $\Omega\text{m}$ , 1680  $\Omega\text{m}$  interpretados como limo, arena arcillosa, grava no saturada.

## 7.2 Tomografía de refracción sísmica (TRS)

- Perfil sísmico de la línea 1: muestra la presencia de 3 capas: Capa 1 velocidad de onda P ( $V_p$ ) entre 278 m/s y 475 m/s con un espesor variable de 1.2 m a 2.7m. Clasificada como una grava o arena seca. Capa 2 valores de  $V_p$  entre 475 m/s y 719 m/s con un espesor variable de 2.5m a 9.5m, clasificada como una grava o arena seca. Capa 3 velocidades mayores a 719 m/s como se muestra en la figura 25 clasificada como una arena grava o arena seca.

- Perfil sísmico de la línea 2: muestra la presencia de 3 capas: Capa 1: velocidad de onda p ( $V_p$ ) entre 266 m/s y 636 m/s con un espesor variable de 1.7 m a 4.3 m. Clasificada como una grava o arena seca. Capa 2:  $V_p$  entre 636 m/s y 741m/s con un espesor variable de 5.7 m a 16 m. Clasificada como una grava o arena seca. Capa 3: velocidades mayores a 741 m/s. Clasificada como una grava o arena seca.

## 7.3 ANALISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)

MASW 1D y MASW 2D estas técnicas son utilizadas para clasificar el tipo de suelo utilizando la Tabla A.2.4-1 “clasificación de los perfiles de suelo” según la Norma Sismo Resistente, colombiana, NSR-10.



### **7.3.1 MASW 1D**

Línea 1: se identificaron 3 capas, con velocidades promedio de 357.225 m/s, se alcanzó una profundidad aproximada de 21 m, se clasifico como un perfil de suelo tipo D.

Línea 2: se identificaron 3 capas, con velocidades promedio de 344.1 m/s, se alcanzó una profundidad aproximada de 32 m, se clasifico como un perfil de suelo tipo D.

### **7.3.2 MASW 2D**

Línea 1: Velocidad promedio de 329.836 m/s, alcanzó una profundidad aproximada de 21 m, se clasifico como un perfil de suelo tipo D.

Línea 2: Velocidad promedio de 323.3 m/s, alcanzó una profundidad aproximada de 27 m, se clasifico como un perfil de suelo tipo D.

## **7.4 Ensayo de penetración estándar (SPT)**

Sondeo 1: Se obtuvo una profundidad máxima alcanzada de 3.66 m, se presentó rechazo por presencia de un material rocoso no homogéneo, se obtuvo un limo inorgánico y arenas limosas.

Sondeo 2: Se obtuvo una profundidad máxima alcanzada de 3.66 m, presentó rechazo por presencia de un material rocoso no homogéneo, se obtuvo un limo inorgánico y arenas arcillosa.

## Conclusiones

- Los sondeos eléctricos verticales (SEV) son una técnica que permite conocer las propiedades geoeléctricas de los materiales presentes en el área de estudio en determinados puntos a lo largo de la línea de estudio a diferentes profundidades y permite obtener un perfil con las resistividades aparentes; se encontraron resistividades aparentes que corresponden a limos hasta los 1.5 -2 m y a mayor profundidad muestra resistividades que corresponden a arenas.
- Los métodos sísmicos utilizados en esta investigación fueron la refracción sísmica, el MASW los cuales son muy útiles en la geotecnia ya que pueden ser aplicados con cierta eficiencia de acuerdo a los objetivos planteados disminuyendo el grado de incertidumbre en los estudios geotécnicos.
- La profundidad promedio alcanzada fue de 16 m, la cual influye la distancia de la línea el espaciamiento entre geófonos y la energía proporcionada por la fuente.
- Con el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 2D) se hallaron velocidades a 30 m las que oscilan entre los 170 m/s y 430 m/s permitiendo clasificar el tipo de suelo de la zona de estudio como tipo D de acuerdo a la tabla A.2.4-1 “clasificación de los perfiles de suelo”; de la NSR-10.
- Las técnicas geofísicas permiten analizar grandes profundidades y permiten determinar puntos críticos como nivel freático, basamentos, entre otros, facilitando el trabajo, y maximizando los recursos.
- Las técnicas geofísicas tienen buena resolución y permiten adquirir buenas geometrías, pero es indispensable correlacionar la información adquirida por estas

técnicas con las adquiridas con la geotecnia, con el objetivo de realizar una buena interpretación.

- El ensayo de penetración estándar arroja rechazo aproximadamente a los 3.66 m, permitiendo estudiar solo una fracción de terreno lo cual no es muy confiable teniendo en cuenta las características geológicas del terreno.
- En la zona de estudio se realizaron 2 sondeos para el ensayo de SPT permitiendo extraer muestras de suelo las cuales fueron llevadas al laboratorio, realizando los respectivos análisis se encontró la presencia de limos inorgánicos y arenas arcillosas.

### Lista de referencias

- López Prado A. R. (2016). Evaluación geofísica geotécnica del proyecto central hidroeléctrica chilia, región huanuco-ancash
- Aceves, A. A. (2003). Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. sanfandilia, Querétaro, México: Instituto Mexicano del transporte.
- Álvarez Ruiz F.E. (2019). Integración de métodos geofísicos, SPT y análisis de laboratorio para la caracterización del subsuelo en el parqueadero del patinódromo municipal del municipio de Pamplona. Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura.
- Chaves Agudelo D.L. (2016) Caracterización y Zonificación Sismogeotécnica de 700 Ha en la Zona Rural del Nor Occidente del Municipio de Barrancabermeja, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingenierías, Departamento de Ingeniería civil y Agrícola, Bogotá D.C, Colombia
- CORPONOR. (2002). Plan de Básico Ordenamiento Territorial. Pamplona. Colombia: Norte de Santander.
- García Hermoso, Fernando (2006). “Estudios Geotécnicos” Escuela Politécnica Superior, Huesca, España.
- Geometrics, Simplyfy your search, Geode Exploration Seismograph, [en línea], San José, CA, U.S.A., 2020. Disponible en: <https://www.geometrics.com/product/geodeexploration-seismograph/>
- Anderson, N., Chen, G., Kociu, S., Luna, R., Thitimakorn T., 2003, “Vertical Shear-Wave Velocity Profiles Generated From Spectral Analysis Of Surface Waves:

Field Examples”, Report RDT 03-006, Missouri Department of Transportation Research, Development and Technology, Jefferson City, Missouri

- Invias 111-07. (2013). Ensayo de Penetración Normal (SPT) y Muestreo de Suelos con Tubo Partido. Bogotá. Colombia: I.N.V.I.A.S.
- INV E-213-07. (2013). Análisis Granulométrico de Agregados Gruesos y Finos. Bogotá, Colombia: I.N.V.I.A.S.
- Invias 122-07. (2013). Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado. Bogotá. Colombia: I.N.V.I.A.S.
- INV E 125-07. (2013). Determinación del Limite liquido de los Suelos. Bogotá, Colombia: I.N.V.I.A.S.
- Arias, D. E. (2011). Exploración geotécnica- Relaciones Geoeléctrica. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- A. W. Skempton, “Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation,” *Géotechnique*, vol. 37, no. 3. pp. 411-412, 09-Jan1987
- ASTM International, Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation. Designation: D 5777
- INV E-126-07. (2013). Limite Plástico e Índice de plasticidad de los Suelos. Bogotá, Colombia: I.N.V.I.A.S.
- IPI2win - 1D interpretation of VES profile 119899, Russia, Moscow, Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics. V.A. Shevnin, I.N.Modin [en línea]. Disponible en: <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>

- López Avalos, J.M, Mejía Cariillos J.A, Vega N.D (2008). Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de onda P, Universidad de El Salvador.
- Jaimes Villamizar J.D. (2011). Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: estado de arte, Universidad Industrial de Santander, facultad de Fisicomecánicas, escuela de ingenierías, Santander, Colombia.
- L. Grcev. Numerical analysis of the transient voltages near grounding systems. pages 105–110, Berlin-Germany, September 1992.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, Título A — Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, D.C., Colombia, 2010, 186 P.
- Moya Gutiérrez A.J., Torres Peña, J.A. y Contreras, M.A. (2020). Caracterización de sitio empleando prospección geofísica y geotécnica. Caso de estudio vía principal Troncal Central del Norte (Ruta Nacional 55) a la altura del Km 68+500 en el Municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia. Boletín ciencias de la tierra, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín facultad de minas. Disponible en <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct>
- Prof. Henryk Markiewicz & Dr Antoni Klajn “Puestas a tierra y EMC”, Wrocław University of Technology, junio 2003.: Leonardo Power Quality Initiative.6.3.1
- Rosales, C. (2001). comportamiento sísmico de los suelos del área de cañaveralejo, Cali, Colombia. cañaveralejo, Cali, Colombia: universidad del Valle.

- Sánchez-Duarte, J.A., Contreras, M.A. y Torres, J.A., Caracterización geotécnica del subsuelo en el relleno sanitario regional “la Cortada”, Pamplona (Norte de Santander) a partir de datos geofísicos, *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(36), pp. 9-17, 2020. DOI: 10.24054/16927257.v36n36.2020.3991.
- Sarria, A. (1996). *Métodos geofísicos con aplicaciones a la Ingeniería Civil*. Bogotá, DC: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Uniandes.