



**APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA  
CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUBSUELO EN EL BARRIO EL  
ORFANATO, MUNICIPIO DE PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER. COLOMBIA**

**Lendy Fabiola Parra Basto**

**Universidad de Pamplona  
Facultad de Ingenierías y Arquitectura  
Programa Ingeniería civil  
Pamplona, Colombia  
2020**

Aplicación de los métodos de prospección geofísica para la caracterización geotécnica del subsuelo en el barrio el Orfanato, Municipio de Pamplona, Norte de Santander. Colombia ii

Lendy Fabiola Parra Basto  
1094270834

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

**Ingeniera 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  
2020

In this research, geotechnical and geophysical methods were applied, which were used for the characterization of the subsoil in the neighborhood of El Orfanato, in the municipality of Pamplona, Norte de Santander (Colombia). The geotechnical technique that was applied for this study was the Standard Penetration Test (SPT), and for the geophysical area the Vertical Electric Probing (SEV), the Seismic Refraction Tomography (TRS) and the Multichannel Analysis of Surface Waves were used. (MASW 1D and 2D), these techniques allow to know the dynamic parameters of the soil, the electrical resistivity and the velocities of P and S waves of the different materials found in the study area; It was developed in three (3) phases: the field phase that consisted of the survey of 3 seismic lines, where a topographic survey was carried out, five (5) standard penetration tests (SPT) at a maximum depth of 4.57 meters, eighteen (18) vertical electrical soundings (SEV), for the acquisition of data from seismic refraction tomography (TRS) and multichannel analysis of surface waves (MASW 1D and MASW 2D) a laying of three (3) lines of 80.5 meters of length. The data processing phase, which consisted of processing the data acquired in the field, through laboratory tests and specialized software. In the data analysis and interpretation phase, the interpretation and correlation of the data was carried out, giving as results, a type D soil profile according to the Colombian building code (NSR-10), composed of inorganic silt and clay sands, P wave speeds between 260 m / s and 766 m / s, S wave speeds between 170 m / s and 430 m / s.

**Keywords:** Geophysics; Geotechnics; Seismic Refraction; Elastic wave.

En esta investigación se aplicaron métodos geotécnicos y geofísicos, los cuales fueron utilizados para la caracterización del subsuelo en el barrio el Orfanato, en el municipio de Pamplona, Norte de Santander (Colombia). La técnica geotécnica que se aplicó para este estudio fue el Ensayo de Penetración Estándar (SPT), y para el área de geofísica se usaron el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), la Tomografías de Refracción Sísmica (TRS) y el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW 1D y 2D), estas técnicas permiten conocer los parámetros dinámicos del suelo, la resistividad eléctrica y las velocidades de ondas P y S de los diferentes materiales encontrados en el área de estudio; se desarrolló en tres (3) fases: la fase de campo que consistió en el levantamiento de 3 líneas sísmicas, donde se realizó un levantamiento topográfico, cinco (5) ensayos de penetración estándar (SPT) a una profundidad máxima de 4.57 metros, dieciocho (18) sondeos eléctricos verticales (SEV), para la adquisición de datos de tomografía de refracción sísmica (TRS) y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D y MASW 2D) se hizo un tendido de tres (3) líneas de 80.5 metros de longitud. La fase de procesamiento de datos la cual consistió en procesar los datos adquiridos en campo, mediante ensayos de laboratorio y software especializados. La fase de análisis e interpretación de datos en ella se realizó la interpretación y correlación de los datos dando como resultados, un perfil del suelo tipo D de acuerdo al código de construcción colombiano (NSR-10), compuesto por limos inorgánicos y arenas arcillosas, velocidades de onda P entre 260 m/s y 766 m/s, velocidades de onda S entre 170 m/s y 430 m/s.

**Palabras clave:** Geofísica; Geotecnia; Refracción Sísmica; Onda elástica.

## Tabla de Contenidos

v

Capítulo 1.....	1
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	3
2. Planteamiento del problema y justificación.....	4
3. Objetivos.....	6
3.1 Objetivo general.....	6
3.2 Objetivos específicos.....	6
Capítulo 2.....	7
4. Marco referencial.....	7
4.1 Marco contextual.....	7
4.1.1 Localización geográfica.....	7
4.2 Marco teórico.....	9
4.2.1 Exploración del subsuelo.....	9
4.2.1.1 Ensayo de penetración estándar (SPT).....	10
4.2.1.2 Análisis de laboratorio.....	13
4.2.2 Técnicas Eléctricas:.....	18
4.2.3 Técnica Sísmica.....	23
4.2.3.1 Propagación y trayectoria de las ondas.....	24
4.2.2.1 Tipos de ondas.....	26
Capítulo 3.....	31
5. Metodología.....	31
5.1 Primera fase de campo.....	31
5.2 Segunda fase de procesamiento de datos.....	41
5.2.1 Ensayo de penetración estándar (SPT de sus siglas en ingles).....	41
5.2.2 Sondeo eléctrico vertical (SEV).....	42
5.2.3 Tomografía de refracción sísmica (TRS).....	44
5.2.4 Análisis multicanal de ondas superficiales MASW.....	45
5.3 Tercera fase de análisis e interpretación de datos.....	48
Capítulo 4.....	49
6. Resultados.....	49
6.1 Ensayo de penetración estándar SPT.....	49
6.2 Sondeo eléctrico vertical SEV.....	58
6.3 Tomografía de refracción sísmica TRS.....	64
6.4 Análisis multicanal de ondas superficiales MASW.....	67
6.5 Correlación geotécnica por métodos geofísicos.....	71
7. Análisis de resultados.....	73
7.1 Ensayo de penetración estándar (SPT).....	73
7.2 Sondeo eléctrico vertical (SEV).....	74
7.3 Tomografía de refracción sísmica (TRS).....	76
7.4 ANALISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW).....	77
7.4.1 MASW 1D.....	77
7.4.2 MASW 2D.....	78
Conclusiones.....	79
Lista de referencias.....	81

Tabla 1. Coordenadas de las líneas de ensayo.....	8
Tabla 2 Clasificación de ensayos de campo para la exploración del subsuelo.....	9
Tabla 3 Coeficientes de corrección SPT.....	13
Tabla 4 Adquisición de datos sondeo 1.....	35
Tabla 5 Adquisición de datos sondeo 2.....	35
Tabla 6 Adquisición de datos sondeo 3.....	36
Tabla 7 Adquisición de datos sondeo 4.....	36
Tabla 8 Adquisición de datos sondeo 5.....	37
Tabla 9 Parámetros de adquisición de datos para los métodos sísmicos.....	41
Tabla 10. Correcciones del ensayo SPT, perforación 1.....	42
Tabla 11 Perfil estratigráfico SPT 1.....	50
Tabla 12 Perfil estratigráfico SPT 2.....	51
Tabla 13 Perfil estratigráfico SPT 3.....	52
Tabla 14 Perfil estratigráfico SPT 4.....	53
Tabla 15 Perfil estratigráfico SPT 5.....	54
Tabla 16 Correcciones del ensayo SPT, perforación 2.....	55
Tabla 17 Correcciones del ensayo SPT, perforación 3.....	55
Tabla 18 Correcciones del ensayo SPT, perforación 4.....	56
Tabla 19 Correcciones del ensayo SPT, perforación 5.....	56
Tabla 20 Parámetros del suelo (NovoSPT).....	57
Tabla 21. Velocidades de onda S MASW 1D.....	67
Tabla 22 Correlación geotécnica por métodos geofísicos para la línea 1.....	71
Tabla 23 Correlación geotécnica por métodos geofísicos para la línea 2.....	71
Tabla 24 Correlación geotécnica por métodos geofísicos para la línea 3.....	72

Figura 1	Localización de la zona de estudio.....	8
Figura 2	Esquema general del equipo para el ensayo de penetración estándar (SPT), sistema de soga: A. sentido antihorario, B. sentido horario. ....	10
Figura 3	Muestreador de tubo partido.....	11
Figura 4	Ensayo contenido de humedad.....	14
Figura 5	Ensayo de granulometría, a. pesado de la muestra, b. lavado de la muestra, c. tamizado de la muestra, d. material retenido en cada tamiz. ....	15
Figura 6	Distribución granulométrica de la muestra.....	16
Figura 7	Cazuela de Casagrande.....	17
Figura 8	Limites de Atterberg, a y b. determinación del limite liquido, c. limite plástico.....	18
Figura 9	Arreglo de electrodos para sondeo eléctrico vertical (SEV) .....	21
Figura 10	Resistividad de varios suelos.....	21
Figura 11	Resistividad de varios suelos.....	22
Figura 12	Distribución en campo de los sensores para el ensayo de refracción sísmica .....	24
Figura 13	Ley de Snell.....	26
Figura 14	Tipos de ondas. a. ondas primarias, b. ondas secundarias, c. ondas love, d. ondas Rayleigh.....	28
Figura 15	Equipo topográfico RTK Stonex S800 GNSS, a. estación base; b. estación móvil. ....	32
Figura 16	Equipo de ensayo de penetración estándar (SPT) .....	33
Figura 17	Muestra recuperada de ensayo de penetración estándar (SPT); a. Apique 4, muestra 1, profundidad 0.46m; b. Apique 4, muestra 4, profundidad 1.83m; c. longitud de la muestra del apique 4, muestra 3, profundidad 1.37; d. Muestra total recuperada.....	34
Figura 18	Sondeo eléctrico vertical, a. Equipo geoelectrónica (GeoAmp), b. adquisición de datos eléctricos.....	38
Figura 19	Equipo de MASW .....	39
Figura 20	Geometría de adquisición de datos sísmicos, a. TRS, b. MASW 1D, c. MASW 2D .....	40
Figura 21	Procesamiento sondeo eléctrico vertical, a) Dispersión de las resistividades en función del espaciamiento, b) curva de resistividad aparente Vs AB/2, c) profundidad de las capas respecto a la resistividad.....	43
Figura 22	Procesamiento de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS). a) Picado de los primeros arribos de la onda refractada. b) Selección de capas. c) Modelo inicial basado en la inversión de mínimos cuadrados. d) Modelo final a partir de la inversión por tomografía..	44
Figura 23	Procesamiento de Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D). a) Registro de las ondas superficiales, b) Curva de dispersión, c) Modelo inicial, d) Modelo final. ....	46
Figura 24	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. .....	47
Figura 25	Sondeo Eléctrico Vertical (línea 1), a. SEV_1, b. SEV_2, c. SEV_3, d. SEV_4, e. SEV_5, f. SEV_6.....	58
Figura 26	Sondeo Eléctrico Vertical (línea 2), a. SEV_1, b. SEV_2, c. SEV_3, d. SEV_4, e. SEV_5, f. SEV_6.....	60
Figura 27	Sondeo Eléctrico Vertical (línea 3) a. SEV_1, b. SEV_2, c. SEV_3, d. SEV_4, e. SEV_5, f. SEV_6.....	62

Figura 28 Tomografía de Refracción Sísmica (modelo final línea 1) .....	64viii
Figura 29 Tomografía de Refracción Sísmica (modelo final línea 2) .....	65
Figura 30 Tomografía de Refracción Sísmica (modelo final línea 3) .....	66
Figura 31 Análisis multicanal de ondas superficiales, MASW 2D (modelo final línea 1).....	68
Figura 32 Análisis multicanal de ondas superficiales, MASW 2D (modelo final línea 2).....	69
Figura 33 Análisis multicanal de ondas superficiales, MASW 2D (modelo final línea3).....	70



## **Capítulo 1**

### **Introducción**

En esta investigación se pretende realizar estudios geotécnicos y geofísicos con el fin de correlacionar las propiedades del subsuelo del área de estudio para caracterizarlo de acuerdo a la norma sismo resistente colombiana (NSR-10)

Para el área de Geotécnica se realizará el Ensayo de Penetración Estándar (SPT de sus siglas en inglés) posteriormente a las muestras recuperadas se les realizara ensayos de laboratorio lo que permitirá realizar un análisis e interpretación; las técnicas Geofísicas que se aplicarán para este estudio serán: Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) las cuales permitirán conocer el tipo de material que se encuentra en el área de estudio mediante las resistividades eléctricas encontradas, Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) permite evaluar las velocidades de onda P y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW de sus siglas en inglés) permite conocer las velocidades de onda S presentes en el área de estudio, con la correlación e interpretación de estos datos se puede caracterizar el perfil de suelo estudiado.

Con el paso del tiempo los métodos de exploración geofísica se han vuelto indispensables para las exploraciones geotécnicas ya que nos brindan información importante acerca de los materiales que se pueden encontrar en la zona de estudio, lo que permite realizar una correcta caracterización del sitio previa a la construcción de una edificación, permitiendo optimizar en términos tanto de tiempo como de costo, lo que

permite prevenir riesgos asociados a las características del sitio de estudio. En algunas ocasiones, el estudio de la mecánica de suelos es limitado, ya que no permite alcanzar profundidades muy grandes, por lo cual, es necesario recurrir a métodos complementarios como lo son los geofísicos los cuales son considerados como técnicas no invasivas que pueden utilizarse en terrenos escarpados y de difícil acceso, permitiendo alcanzar mayores profundidades y aplicar la física en el estudio de la estructura y composición de las diversas capas del subsuelo.

## 1. Antecedentes

Los métodos geofísicos utilizan tienen un papel importante en las investigaciones geotécnicas, ya que se utiliza una metodología 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.

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)

Métodos geofísicos aplicados a la caracterización geotécnica (“Jaimes Villamizar, 2011”, “Chaves Agudelo, 2016)

Siendo transmitida a métodos con fines más constructivos, con exploraciones someras, ayudando a caracterizar los suelos, y determinar los parámetros geotécnicos, vitales para el diseño de cualquier edificación, siendo utilizados como objeto de estudio, para correlacionar los métodos geofísicos y los ensayos geotécnicos, determinando los parámetros del suelo, en el Ecuador estos cálculos se están realizando en base a geofísica y más concretamente utilizando métodos sísmicos empleando ondas superficiales, correlacionando los ensayos de compresión triaxial, ensayo de corte directo, que consiste en obtener muestras inalteradas y con el ensayo de penetración estándar (SPT), (Avilés, 2016).

## **2. Planteamiento del problema y justificación**

Colombia es un país que presenta un alto riesgo sísmico ya que se encuentra ubicado en el cinturón de fuego del Pacífico, debido a esta problemática se hace necesario crear un reglamento de construcción sísmo resistente en el cual se realiza una zonificación sísmica del territorio colombiano, y dar unas pautas en cuanto a la construcción de edificaciones permitiendo defender la vida y disminuir el riesgo de colapso de las edificaciones ante la presencia de actividad sísmica.

El municipio de Pamplona se encuentra ubicado en una zona de amenaza sísmica alta para la cual es fundamental analizar el suelo como un material de cimentación, a través de un estudio de mecánica de suelos, por medio de métodos convencionales de investigación subsuperficial como lo son los apiques, los ensayos de penetración estándar (SPT), sondeos mecánicos rotativos; estos ensayos nos dan un cierto grado de

incertidumbre ya que generalmente el suelo es heterogéneo y presenta cambios laterales bruscos que no siempre son identificados mediante por medio de los sondeos, gracias a los avances tecnológicos de la geofísica se puede analizar el subsuelo horizontal y verticalmente disminuyendo el grado de incertidumbre; estos ensayos geofísicos son un complemento de los métodos de exploración convencionales que permiten obtener información detallada del área de estudio.

### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo general

Aplicar los métodos de prospección geofísica para la caracterización geotécnica del subsuelo en el barrio El Orfanato, municipio de Pamplona, Norte de Santander. Colombia

#### 3.2 Objetivos específicos

- Obtener los parámetros dinámicos como módulo de Poisson " $\nu$ ", peso específico " $\gamma$ ", módulo de Young " $E$ ", módulo de corte " $G$ ", a partir de los ensayos directos usando SPT.
- Determinar el contenido de humedad, los límites líquidos, índice plástico y el tamaño de los granos de los diferentes materiales para las muestras recolectadas que se encuentren en el área de estudio a partir del ensayo directo.
- Evidenciar los contrastes de la resistividad eléctrica para los materiales presentes en el área de estudio mediante la realización de sondeos eléctricos verticales (SEV).
- Determinar los valores velocidad de las ondas sísmicas P y S de los materiales presentes en el área de estudio mediante la aplicación del ensayo de tomografía de refracción sísmica (TRS) y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) respectivamente.
- Correlacionar los parámetros geotécnicos a partir de los ensayos directos con los ensayos indirectos (geofísicos).
- Clasificación del tipo de suelo según la Norma Sismo Resistente, colombiana NSR-10 basados en los ensayos aplicados.

## Capítulo 2

### 4. Marco referencial

#### 4.1 Marco contextual

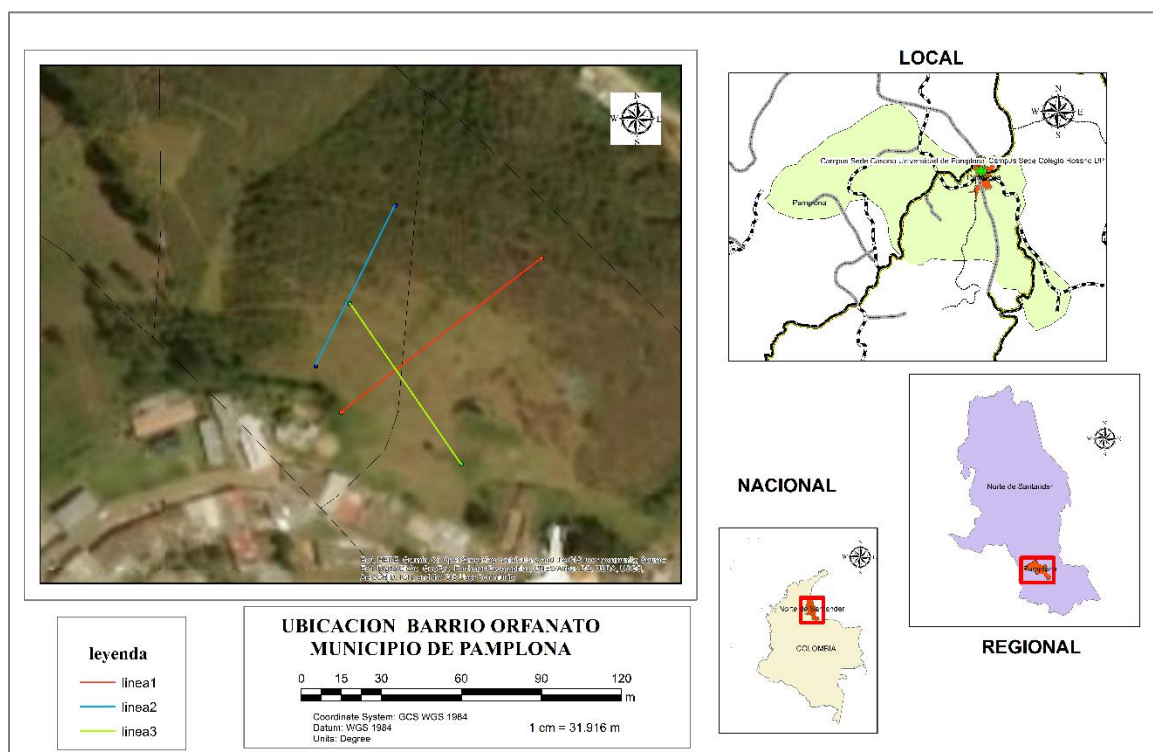
##### 4.1.1 Localización geográfica

El municipio de Pamplona se encuentra ubicado en las coordenadas  $72^{\circ} 39'$  de longitud oeste y a  $7^{\circ} 23'$  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 La Bateca 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)

La zona de estudio se encuentra ubicada en las coordenadas  $7^{\circ} 23' 05.12''$  de latitud norte y a  $72^{\circ} 39' 07.26$  de longitud oeste, situado a una altitud de 2462 metros sobre el nivel del mar, en el municipio de Pamplona. ver figura 1.

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.

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



*Fuente. Autor*

**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
Línea 3	7° 23' 04.61" N	72° 39' 05.72" O	7° 23' 06.56" N	72° 39' 07.08" O

*Fuente. Autor*



## 4.2 Marco teórico

### 4.2.1 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 (ver tabla 2) 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.

*Tabla 2 Clasificación de ensayos de campo para la exploración del subsuelo.*

<b>Ensayos de Campo</b>	<b>A. Ensayos Directos</b>	1. Sondeos Mecánicos	a. Sondeos Preliminares	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de Penetración Estándar (SPT).</li> <li>• Método de lavado.</li> <li>• Método de Penetración Cónica.</li> </ul>
			b. Sondeos Definitivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de Pared Delgada Shelby.</li> <li>• Muestreo con Tubo Sueco.</li> <li>• Muestreo con Tubo de Pistón.</li> <li>• Muestreo con Tubo Doble Giratorio Denison.</li> <li>• Muestreo Rotatorio para Roca.</li> </ul>
	2. Calicatas o Pozos a Cielo Abierto			
	<b>B. Ensayos Indirectos</b>	1. Penetraciones Dinámicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prueba de Penetración Dinámica Super Pesada (D:P:S:H).</li> <li>• Borros.</li> </ul>	
2. Ensayos Geofísicos		a. Método Gravimétrico. b. Método Magnético. c. Métodos Eléctricos.		
	d. Métodos Sísmicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método Up-Hole.</li> <li>• Método Down-Hole.</li> <li>• Método Cross-Hole.</li> <li>• Método de Reflexión Sísmica.</li> <li>• Método de Refracción Sísmica.</li> <li>• Método MASW.</li> <li>• Método SASW.</li> </ul>		

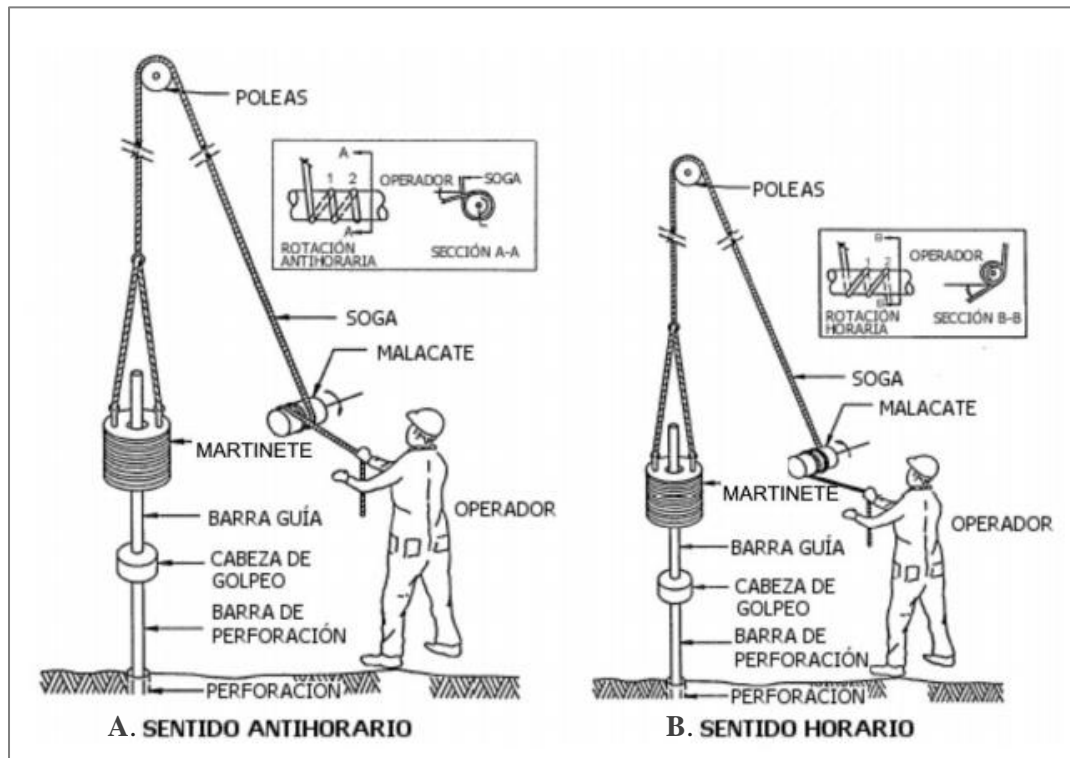
*Fuente. García, 2006.*

- **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)

#### 4.2.1.1 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 2.

*Figura 2 Esquema general del equipo para el ensayo de penetración estándar (SPT), sistema de soga: A. sentido antihorario, B. sentido horario.*

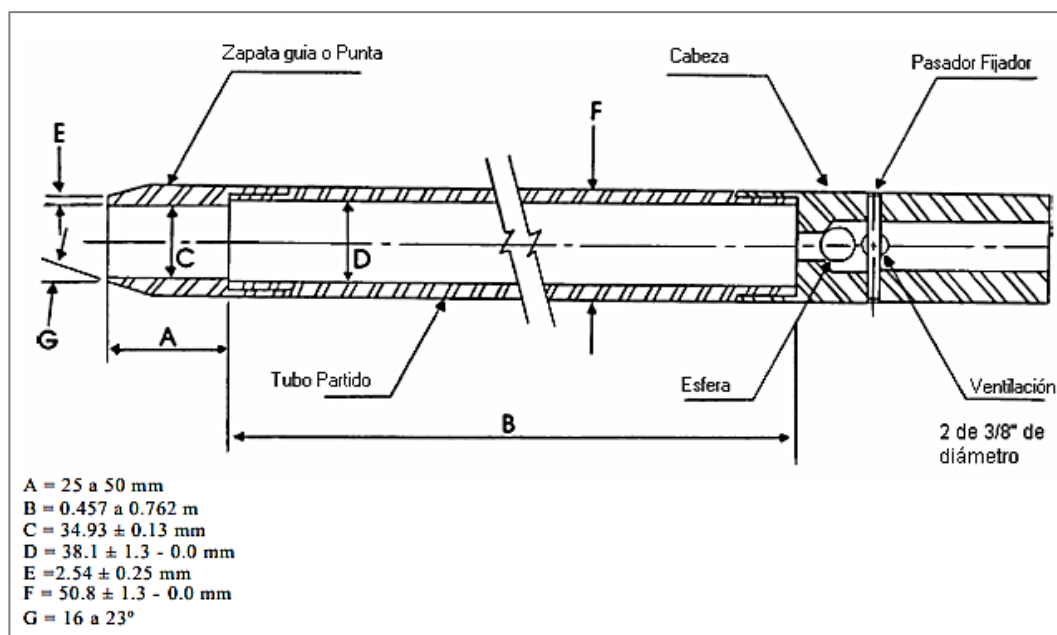


*Fuente. López, 2003*

Mediante este método se obtienen muestras alteras o remoldeadas de suelo, apropiadas para determinar el contenido de humedad, realizar identificación y clasificación de los suelos (INV E-181 e INV E-102).

Se debe hincar un tubo partido, de dimensiones 3.5 cm de diámetro inicial, 3.81cm 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 3 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) como se observa en la tabla 3, estos coeficientes 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 1.*

$N_{60}$  – 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.3.

**Tabla 3** 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	Muestreo estándar	$C_S$	1
	Muestreo 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*

#### 4.2.1.2 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:** Es una de las propiedades índices más significativas de muchos materiales y se emplea para establecer correlaciones con el comportamiento de los suelos. 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 4)

pasado este tiempo se retira del horno, se pesa nuevamente y se procede a calcular, ver ecuación 2.

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

*Ecuación 2.*

$w$  – 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 4** Ensayo contenido de humedad



**Fuente.** Autor

➤ **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 5

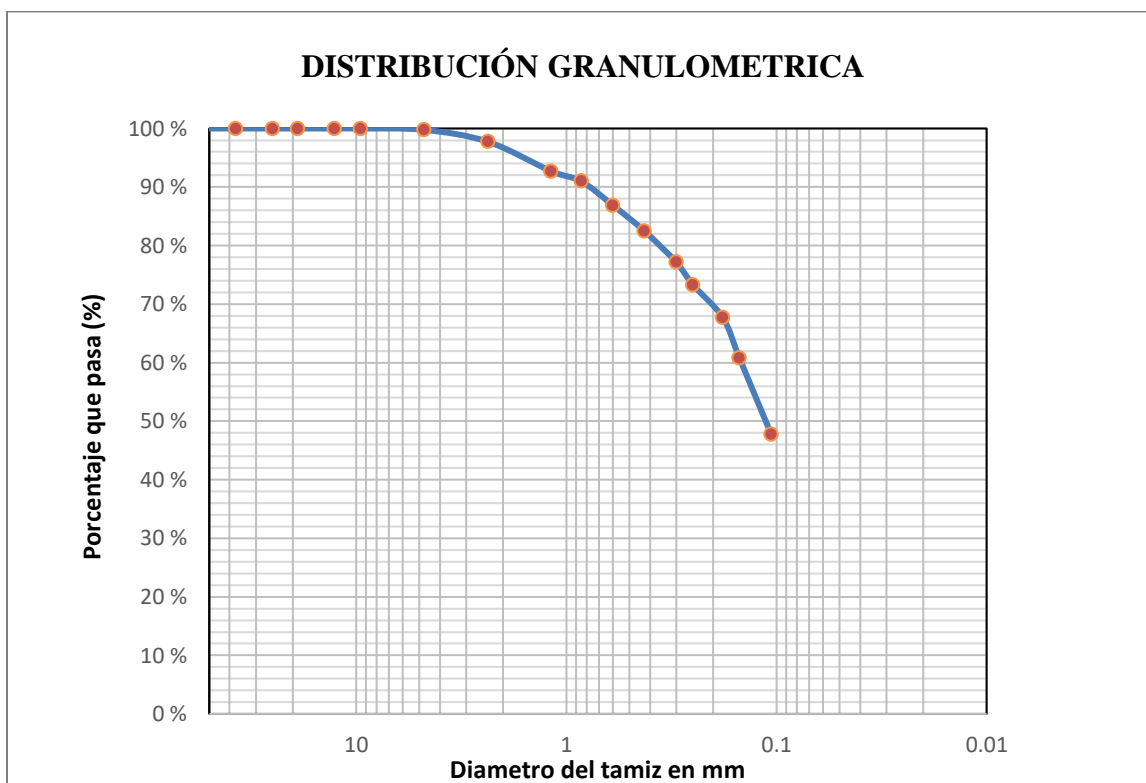
Se obtiene como resultado una distribución semilogarítmica, en la que se observa si el material está bien o mal gradado; también permite determinar los coeficientes granulométricos como el coeficiente de curvatura y el coeficiente de uniformidad, que permiten realizar la clasificación del suelo teniendo en cuenta las especificaciones de la norma sismo resistente, colombiana (NSR-10). Ver figura 6

**Figura 5** 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.** Autor

*Figura 6 Distribución granulométrica de la muestra.*



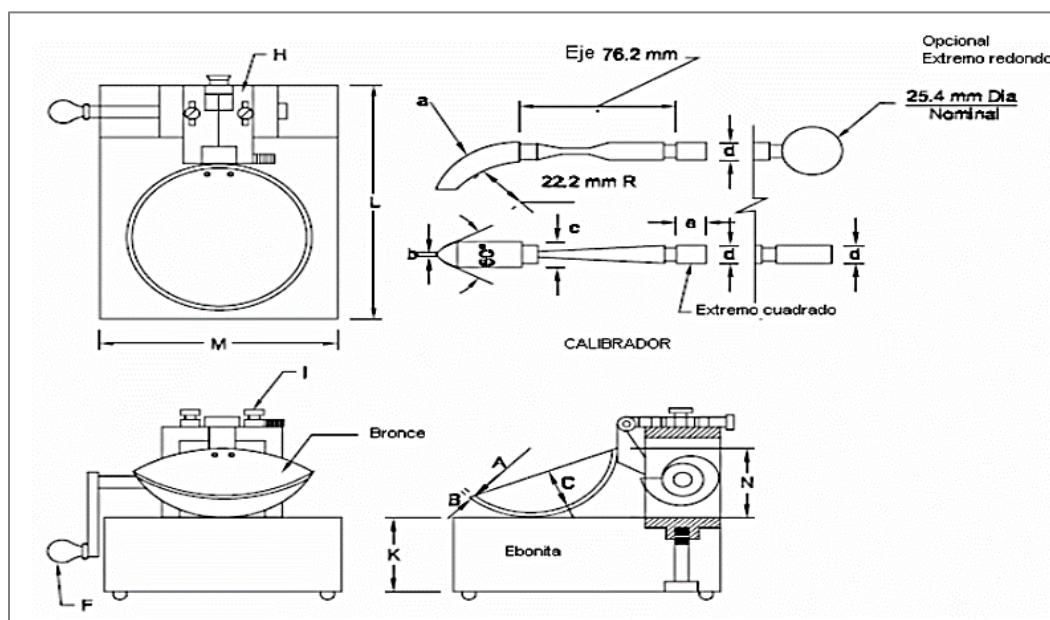
*Fuente. Autor*

➤ **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 (ver figura 7), 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).



*Figura 7 Cazuela de Casagrande*



*Fuente. INV E-125*

- Límite plástico (LP-W<sub>p</sub>):** 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 (ver figura 8). 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)

- **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 3. (INV E-126,2013)

$$IP = LL - LP$$

*Ecuación 3.*

**IP** – Índice de Plasticidad

**LL** – Limite liquido

**LP** – Limite Plástico.

**Figura 8** *Limites de Atterberg, a y b. determinación del limite liquido, c. limite plástico.*



*Fuente. Autor*

#### 4.2.2 Técnicas Eléctricas:

Los estudios eléctricos de superficie representan un método de análisis de los geomateriales en términos de sus propiedades eléctricas. De ellas la resistividad (ver tabas 10 y 11) ha sido relacionada con parámetros petrofísicos como la porosidad y el grado de saturación, entre otros; también se ha utilizado este método para determinar la

existencia de contaminantes en el terreno, antes de iniciar programas de exploración de alto costo. La adquisición de datos de campo puede llevarse a cabo con configuraciones de electrodos que pueden variar su arreglo (ver figura 9) y que dependen estrictamente del objeto para el cual se realiza la exploración. Una configuración corriente en estos métodos eléctricos es el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), dado que es posible 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 (ver figura 8). 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).

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

*Ecuación 4.*

**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. Ver ecuación 5

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

*Ecuación 5.*

**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 ( $\Omega\cdot m$ ), su inversa es la conductividad ( $\sigma$ ) que tiene como unidades siemens/metro (S/m) que equivalen a Ohm/metro ( $\Omega/m$ ). ver ecuación 6

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

*Ecuación 6.*

**$\rho$**  – Resistividad eléctrica

**V** – Potencial eléctrico

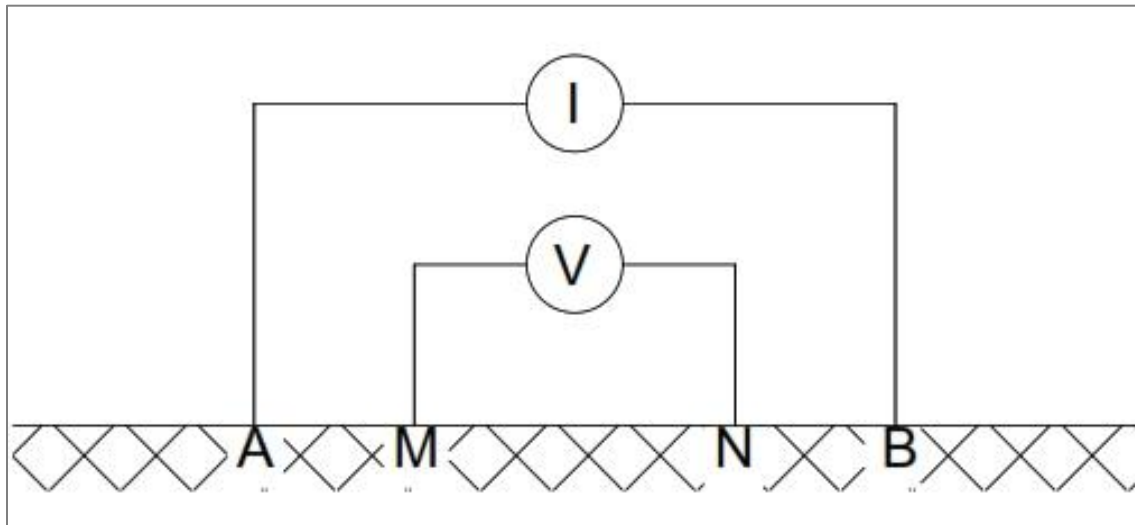
**L** – Longitud

**I** – Corriente eléctrica

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectores 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)

**Figura 9** Arreglo de electrodos para sondeo eléctrico vertical (SEV)



*Fuente. Autor*

**Figura 10** Resistividad de varios suelos

Naturaleza del terreno	Resistividad en $\Omega m$
Terrenos pantanosos	$\pm 3$ a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y Arcillas compactas	100 a 200

Margas del Jurásico	30 a 40
Arenas arcillosas	50 a 500
Arena sílice	200 a 3000
Suelo Pedregoso cubierto de césped	300 a 5000
Suelo Pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Roca de mina y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1500 a 10000
Granito y gres muy alterado	100 a 600

*Fuente. Autor*

**Figura 11 Resistividad de varios suelos**

<b>Naturaleza del terreno</b>	<b>Resistividad en <math>\Omega.m</math></b>
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50 a 100
Margas y Arcillas compactas	100 a 200
Margas del Jurásico	30 a 40
Arenas arcillosas	50 a 500
Arena sílice	200 a 3000
Suelo Pedregoso cubierto de césped	300 a 5000
Suelo Pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Granitos y gres procedente de alteración	1500 a 10000
Roca Ígnea	5000 a 15000

*Fuente. Autor*

### 4.2.3 Técnica Sísmica

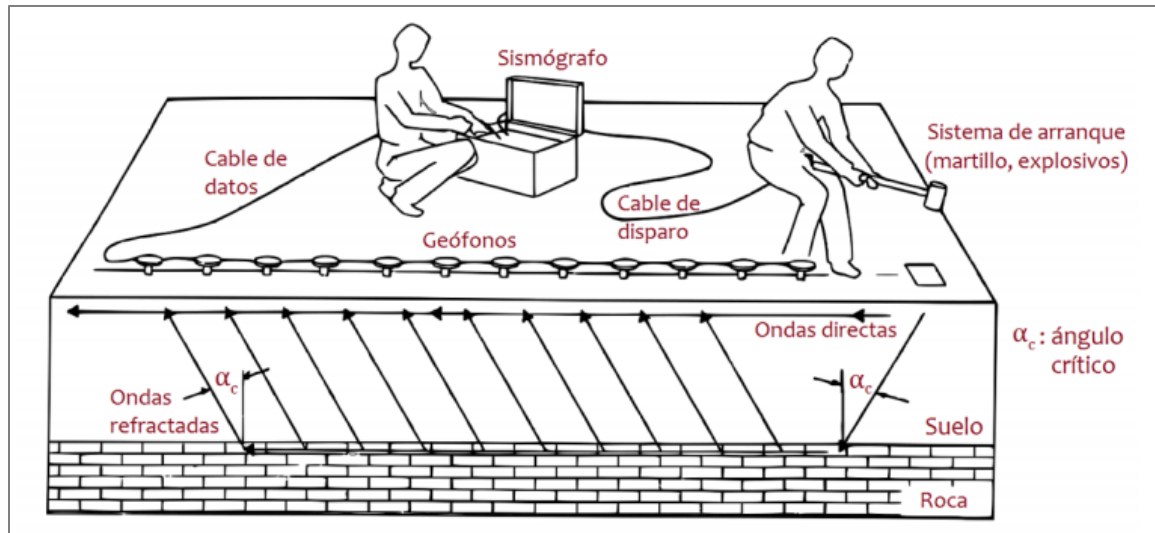
La técnica sísmica que ha sido utilizada por su aporte de información acerca del terreno en estudio, delimitando grandes yacimientos de hidrocarburos, depósitos de minerales, y también utilizado para identificar la estratigrafía del terreno sometido a estudio, siendo esta técnica conocida como refracción (ver figura 12), permitiendo identificar la presencia de estratos de alta velocidad, la profundidad a la que se encuentran estos estratos, y el gradiente de velocidades. Las desventajas para aplicar la sismología son: los materiales suaves confinados por aquellos densos no son detectados, una capa de espesor menor a  $\frac{1}{4}$  de la profundidad al techo del mismo, no es detectada. (Aceves, 2003)

#### **MASW**

Este método utiliza la dispersión de las ondas Rayleigh, que solamente toma dos tercios del total de la energía sísmica generada por el impacto de una fuente sobre la superficie, lo que indica una facilidad relativa de la medición en campo y de la adquisición de datos, por lo que se le considera muy útil.

La forma básica de campo para la configuración y adquisición de datos del método MASW es similar a la que se usa en la medición de reflexión de un punto común de profundidad. Por esta similitud, el método MASW puede ser aplicado a una reflexión o refracción, si son utilizados receptores de baja frecuencia, (López, Mejía & Vega, 2008).

**Figura 12** Distribución en campo de los sensores para el ensayo de refracción sísmica



**Fuente.** ASTM D5777 (2011)

#### 4.2.3.1 Propagación y trayectoria de las ondas

Cuando se generan ondas sísmicas, a partir de golpes en el suelo con una porra, 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:

- ✓ El principio de Huyghens: establece que todo frente de onda se comporta como un nuevo centro generador de ondas.
- ✓ El principio de Fermat: indica que el movimiento ondulatorio entre dos puntos sigue la trayectoria de tiempo mínimo.



- ✓ Ley de refracción: el rayo incidente sobre la superficie de separación (interfaz) entre un medio 1 y otro 2, además de reflejarse en el medio 1, se refleja en él (ver figura 13). El rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran en el mismo plano. El ángulo de refracción  $i_2$  depende de las velocidades entre los medios 1 y 2, y del ángulo de incidencia  $i_1$ , de acuerdo con la relación de Snell, ver ecuación 7. (Morales, 2013)

$$\frac{\text{sen}(i_1)}{\text{sen}(i_2)} = \frac{v_1}{v_2}$$

*Ecuación 7.*

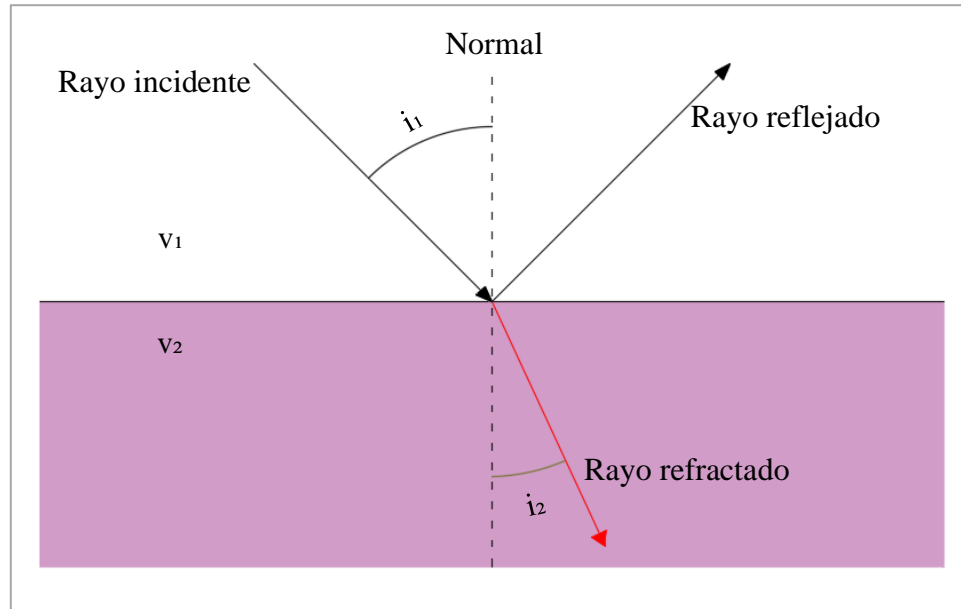
$i_1$  – Ángulo de incidencia

$i_2$  – Ángulo de refracción

$v_1$  – Índice de incidencia

$v_2$  – Índice de refracción

**Figura 13 Ley de Snell**



**Fuente. Autor**

El frente de onda es el lugar geométrico de todos los puntos que tienen el mismo estado de vibración, o igual tiempo de viaje; mientras que la trayectoria indica la dirección y sentido de la propagación y sentido de la propagación del movimiento ondulatorio; la trayectoria siempre será perpendicular a frente de onda. (Aceves, 2003)

#### **4.2.2.1 Tipos de ondas**

Cuando un medio homogéneo se somete a un esfuerzo, se generan tres pulsos elásticos que viajan en todas direcciones a diferente velocidad; dos de ellos son las "ondas de cuerpo", que se propagan en forma de frentes esféricos, mientras que el tercero son las ondas de superficie confinadas en la parte somera y cuya amplitud decae rápidamente en

el cuerpo y a profundidad. Las ondas de cuerpo se dividen en las de compresión o primarias, y las transversales o de corte (ver figura 14). (Aceves, 2003).

✓ Primarias o de compresión (ondas P): son las que se propagan a mayor velocidad, por lo que a cualquier distancia del foco son registradas primero, de allí su nombre. Al propagarse hacen vibrar las partículas en el mismo sentido del tren de ondas, produciendo compresión y dilatación a su paso. Son conocidas también como ondas longitudinales (ver figura 14a).

✓ Secundarias o de cortante (ondas S): Hacen vibrar las partículas en sentido perpendicular al de su propagación. Tienen velocidades menores que las ondas P. Si las partículas oscilan de arriba a abajo, la onda se llama SV, si las partículas oscilan en un plano horizontal se llaman SH. También son conocidas como ondas transversales (ver figura 14b).

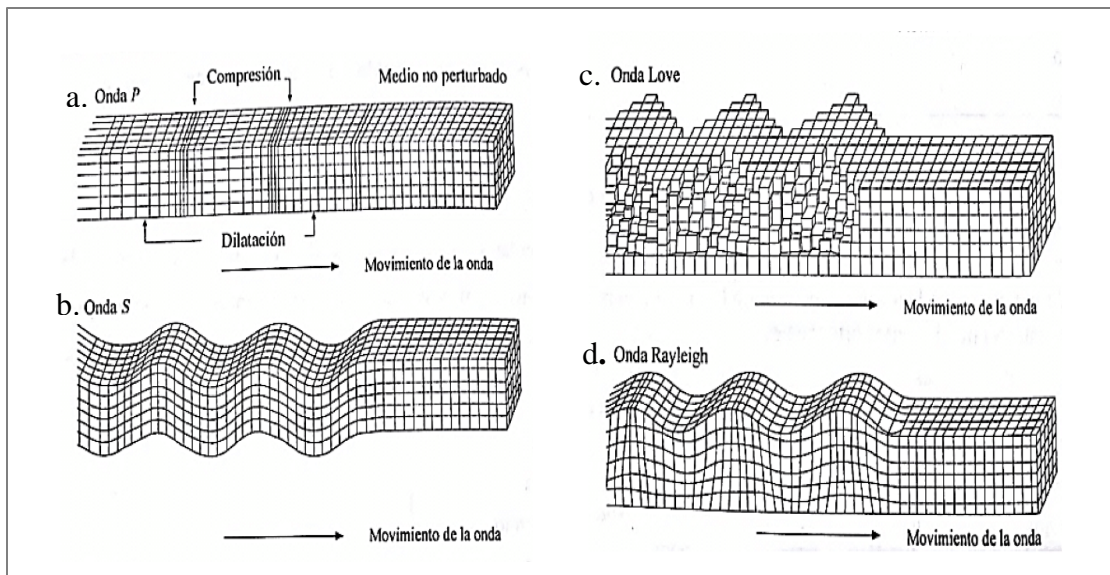
✓ Ondas superficiales.

- Love (ondas L): se propagan de forma similar que las ondas S haciendo vibrar las partículas horizontalmente en sentido perpendicular al de propagación, pero sin movimiento vertical (ver figura 14c).

- Rayleigh (ondas R): tienen un movimiento similar al de las ondas en la superficie del agua, haciendo vibrar las partículas sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimientos elíptico y vertical simultáneamente (ver figura 14d).

Las ondas L y R solo se propagan en discontinuidades de impedancia. (Rosales,2001).

**Figura 14** Tipos de ondas. a. ondas primarias, b. ondas secundarias, c. ondas love, d. ondas Rayleigh



*Fuente. Sarria, 1996*

Las constantes que describen el comportamiento elástico en un medio isotrópico son los módulos de Lamé y de rigidez. Existen tres módulos adicionales que permiten describir también el comportamiento elástico en términos de los dos primeros módulos, ellos son:

- Módulo de Young.
- Módulo de rigidez.
- Coeficiente de Poisson.

En la litósfera las rocas se aproximan a medios isotrópicos, es decir que no lo son completamente. Especialmente las rocas sedimentarias y metamórficas presentan anisotropías. Por ejemplo, las rocas sedimentarias presentan diferencias en sus

propiedades si son medidas en planos paralelos o perpendiculares al plano de estratificación (Rosales, 2001).

### **Coefficiente de Poisson.**

Es la relación entre los cambios unitarios de área de la sección transversal y la deformación longitudinal. La velocidad de propagación de las ondas sísmicas está relacionada con las propiedades elásticas del medio de propagación; entonces, la Relación de Poisson queda dada en la ecuación 8:

$$v = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 1}$$

*Ecuación 8.*

$v$  – Coeficiente de Poisson

$V_p$  – Velocidad de onda P

$V_s$  – Velocidad de onda S

Los materiales de la corteza terrestre presentan un rango de velocidades que va de 100 a 7000 mis; sus frecuencias oscilan entre 10 y 200 Hertz, las longitudes de onda van de 1 a 600 m, entonces, los cuerpos buscados en ingeniería con dimensiones de 1 a 30 m son detectados fácilmente. (Aceves, 2003).

### **Módulo de rigidez**

Es la relación entre el esfuerzo transversal unitario y el desplazamiento relativo de los planos de deslizamiento, mientras que la expresión que lo define está dada por la ecuación 9.

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

*Ecuación 9.*

**G** – Modulo de rigidez

**$\rho$**  – Densidad del terreno

**$V_s$**  – Velocidad de onda S

### **Módulo de Young.**

Es la relación entre el esfuerzo unitario y la deformación longitudinal unitaria, es a la relación entre la fatiga unitaria y correspondiente deformación unitaria en un suelo sometido a esfuerzo. Y se representa con la ecuación 10.

$$E = 2G(1 + \nu)$$

*Ecuación 10.*

**E** – Modulo de Young

**G** – Modulo de rigidez

**$\nu$**  – Coeficiente de Poisson

## **Capítulo 3**

### **5. Metodología**

Esta investigación es de carácter cuantitativa, consta de tres (3) fase; al culminar la investigación se elaborará un informe final para presentar los datos obtenidos y procesados, para cumplir con los objetivos planteados.

#### **5.1 Primera fase de campo**

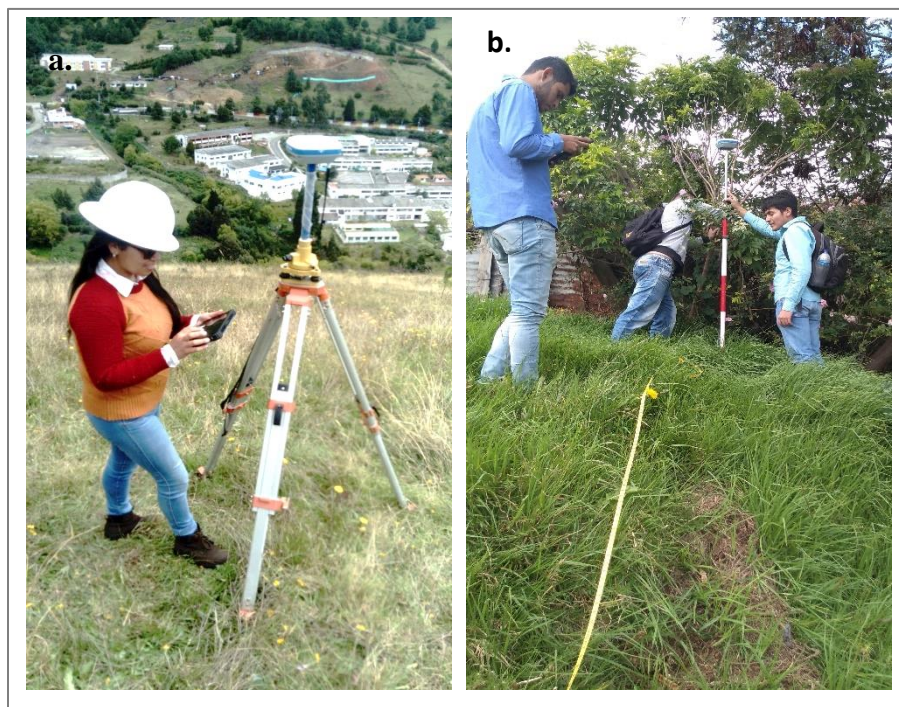
Consistió en el levantamiento de 3 líneas sísmicas, donde se realizó un levantamiento topográfico, cinco (5) ensayos de penetración estándar (SPT) a una profundidad máxima de 4.57 metros, dieciocho (18) sondeos eléctricos verticales (SEV), para la adquisición de datos de tomografía de refracción sísmica (TRS) y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D y MASW 2D) se hizo un tendido de tres (3) líneas de 80.5 metros de longitud.

##### **5.1.1 Levantamiento topográfico**

Se hizo un levantamiento topográfico utilizando el equipo topográfico RTK GNSS (Stonex S800) (ver figura 15), el cual consistió en tomar las elevaciones del punto inicial y el punto final de las tres líneas trabajadas (ver tabla 1), permitiendo adquirir datos con mayor precisión, este es un equipo fácil de transportar, lo que facilita el trabajo en el área de estudio ya que presenta variación de pendiente. Conociendo las condiciones del terreno y adquiriendo el perfil de las líneas se determina la separación y elevación de los geófonos lo cual permite obtener un modelo con más exactitud a las condiciones

reales.

**Figura 15** Equipo topográfico RTK Stonex S800 GNSS, a. estación base; b. estación móvil.



*Fuente. Autor*

### 5.1.2 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 como se puede observar en las figuras 4, 5 y 8, en este procedimiento se puede producir alteración en el espécimen ya que se presenta deformación por corte. Este ensayo consta de tubo partido que va conectado a una tubería de perforación, se introduce dentro de un hueco, dejándola caer suavemente, sin que se introduzca material de las paredes de la perforación, se debe



marcar en el exterior de la tubería con incrementos sucesivos de 0.15 m (6”), ya que permite visualizar con facilidad el avance del muestreado bajo el impacto del martillo que pesa aproximadamente 140 lb (63.503 kg) como se observa en la figura 16, se cuentan el número de golpes aplicados para cada incremento de 0.15 m, cada vez que se saca el muestreador se abre (ver figura 17 a y 17b) y se registra el porcentaje de recuperación o la longitud de la muestra recuperada (ver figura 17c), se hace una breve descripción y se almacena la muestra en un recipiente de manera que no pierda humedad, se etiqueta con el nombre de la obra, la profundidad, la cantidad de golpes en cada uno de los incrementos y el número de perforación (ver figura 17).

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



**Fuente.** Autor

**Figura 17** Muestra recuperada de ensayo de penetración estándar (SPT); a. Apique 4, muestra 1, profundidad 0.46m; b. Apique 4, muestra 4, profundidad 1.83m; c. longitud de la muestra del apique 4, muestra 3, profundidad 1.37; d. Muestra total recuperada.



**Fuente.** Autor

Para esta investigación se llevaron a cabo 5 sondeos o perforaciones alcanzando una profundidad máxima de 4.57 m se registraron los datos de adquisición para cada sondeo como se observa en las tablas de la 4 a la 8.

*Tabla 4 Adquisición de datos sondeo 1*

SPT 1								
PROFUNDIDAD (m)		# TOTAL DE GOLPES PARA ALCANZAR			HUMEDAD		recuperado (cm)	anotaciones
INICIO	FINAL	0-6	6-12	12-18	LONGITUD (cm)	PESO (gr)		
0	0.46	3	4	6	3.5	73.58		
0.46	0.91	3	5	5	3	46.66		
0.91	1.37	5	6	6	3	46.43		
1.37	1.83	5	4	5	3.5	61.8		
1.83	2.29	6	8	7	2	36.48		
2.29	2.74	4	6	6	3	49		
2.74	3.2	6	8	6	4	76		
3.2	3.66	6	8	13	3	59.74		rechazo roca solida

*Fuente. Autor**Tabla 5 Adquisición de datos sondeo 2*

SPT 2								
PROFUNDIDAD (m)		# TOTAL DE GOLPES PARA ALCANZAR			HUMEDAD		recuperado (cm)	anotaciones
INICIO	FINAL	0-6	6-12	12-18	LONGITUD (cm)	PESO (gr)		
0	0.46	2	3	3	3	47.27		
0.46	0.91	4	2	4	4	36.9		
0.91	1.37	4	4	5	2.5	44		
1.37	1.83	3	4	4	4	72.25		
1.83	2.29	4	6	5	4	36.67		
2.29	2.74	6	6	6	3	52.92		
2.74	3.2	6	5	7	3	51.45		
3.2	3.66	10	12	17	1	31.52		rechazo roca solida

*Fuente. Autor*

**Tabla 6** Adquisición de datos sondeo 3

SPT 3								
PROFUNDIDAD (m)		# TOTAL DE GOLPES PARA ALCANZAR			HUMEDAD		recuperado (cm)	anotaciones
INICIO	FINAL	0-6	6-12	12-18	LONGITUD (cm)	PESO (gr)		
0	0.46	4	5	6	3	48		
0.46	0.91	5	5	7	3	59.14		
0.91	1.37	5	4	3	3	58.8		
1.37	1.83	4	5	6	3	47.11		
1.83	2.29	7	5	6	2	35.24		
2.29	2.74	4	4	5	3	55.6		
2.74	3.2	9	8	9	3	66.11		
3.2	3.66	9	8	9	4	69.75		
3.66	4.11	8	10	10	3	58.75		
4.11	4.57	8	11	10	3.5	71.61		rechazo roca solida

*Fuente. Autor*

**Tabla 7** Adquisición de datos sondeo 4

SPT 4								
PROFUNDIDAD (m)		# TOTAL DE GOLPES PARA ALCANZAR			HUMEDAD		recuperado (cm)	anotaciones
INICIO	FINAL	0-6	6-12	12-18	LONGITUD (cm)	PESO (gr)		
0	0.46	4	4	6	3.7	65.73		
0.46	0.91	4	5	7	4	54.35		
0.91	1.37	5	5	5	3	52.2		
1.37	1.83	5	3	4	3.5	62.24		
1.83	2.29	5	5	5	5	88.35		
2.29	2.74	5	5	7	4	67.56		
2.74	3.2	7	8	10	3.5	50.48		
3.2	3.66	6	10	8	4	66		
3.66	4.11	9	11	14	4.5	81.78		rechazo roca solida

*Fuente. Autor*

**Tabla 8** Adquisición de datos sondeo 5

SPT 5								
PROFUNDIDAD (m)		# TOTAL DE GOLPES PARA ALCANZAR			HUMEDAD		recuperado (cm)	anotaciones
INICIO	FINAL	0-6	6-12	12-18	LONGITUD (cm)	PESO (gr)		
0	0.46	3	5	6	2	44.71		
0.46	0.91	5	5	9	4	76.78		
0.91	1.37	6	6	7	3.4	64.86		
1.37	1.83	5	5	6	2	39.15		
1.83	2.29	5	5	6	3	43.17		
2.29	2.74	6	6	6	2.5	45.3		
2.74	3.2	7	7	7	4	84.79		
3.2	3.66	8	9	12	3	46.85		rechazo roca solida

*Fuente. Autor*

### 5.1.3 Sondeo eléctrico vertical (SEV)

Se hizo la configuración de electrodos de manera simétrica respecto a su centro, se le inyector corriente a través de los electrodos para obtener la diferencia de potencial, (Ver figura 11). Los electrodos se hincaron en la superficie del terreno teniendo en cuenta el arreglo dispuesto (ver figura 18b); el arreglo utilizado para esta investigación su el wanner, por su facilidad de manejo y captura de datos. Los equipos que se usaron 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 18a).

**Figura 18** Sondeo eléctrico vertical, a. Equipo geoelectrónica (GeoAmp), b. adquisición de datos eléctricos



*Fuente. Autor*

#### 5.1.4 Tomografía de refracción sísmica (TRS)

Los equipos utilizados para realizar la adquisición de datos del ensayo de refracción sísmica fueron, un sismógrafo Geode de 24 canales marca Geometrics, sensores o geófonos con frecuencia de 14 Hz, trigger, placa metálica, martillo, batería de 12 voltios, cable multipolar, computador con software (seislmanger) (ver figura 19). Este ensayo se realiza en tres (3) líneas de 80.5m de longitud, identificadas las líneas se procede a instalar los geófonos con una separación de 3.5 m respectivamente (ver figura 20a), utilizando 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 para crear un perfil y contra perfil el cual facilita identificar el comportamiento de la onda en el suelo e identificar los primeros arribos de la onda.

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

El método de análisis multicanal de ondas superficiales es utilizado para determinar las ondas de secundarias o las ondas de corte (Vs), permite evaluar las condiciones elásticas del suelo para fines ingenieriles; el equipo que se utilizó para este ensayo consta de un sismógrafo, sensores o geófonos, sensor inercial, martillo, placa metálica, cable (ver figura 19). Se usan 24 sensores con frecuencia de 4.5 Hz, en la línea de 80.5 m con separación de 3.5m. Después de conectar el canal de registro se procede a golpear con un 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 20b)

*Figura 19 Equipo de MASW*

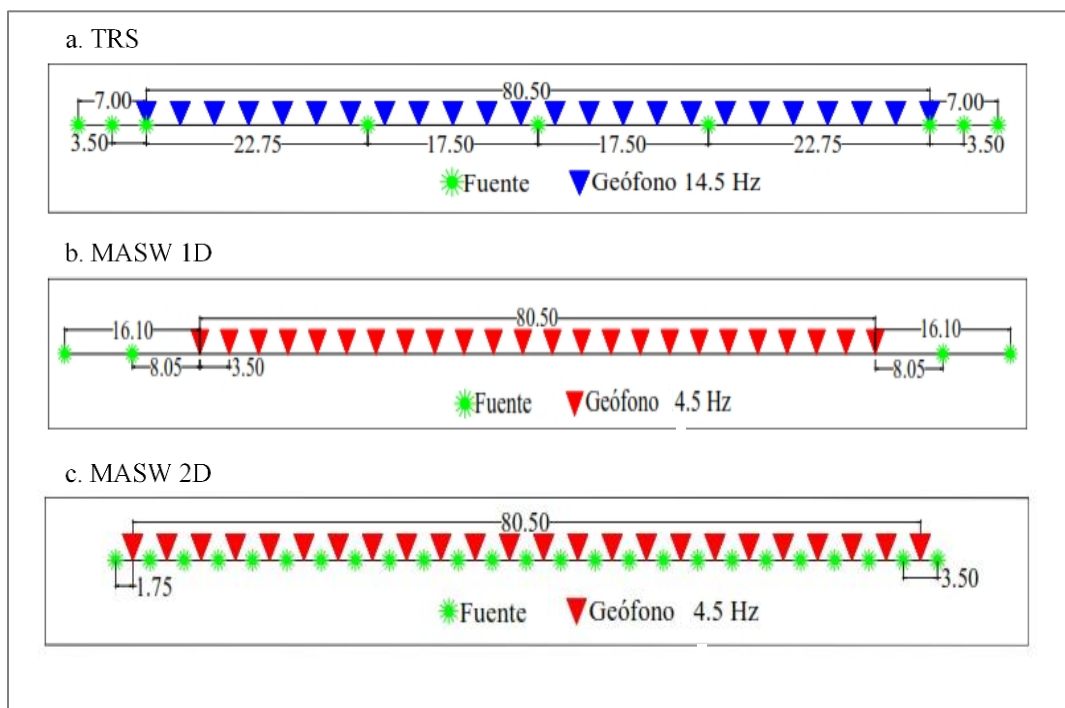


*Fuente. Autor*

Existe otro llamado MASW 2D (ver figura 20c) el cual presenta un análisis en dos dimensiones (largo y profundidad) contra las velocidades de propagación de la onda S, se asumen las mismas condiciones del método MASW 1D, con la excepción de que los golpes se realizan dentro de la línea en el intermedio de cada sensor. Para los ensayos los ensayos sísmicos se tuvieron en cuenta ciertos parámetros de adquisición como se puede observar en la tabla 9 lo cual facilito el trabajo en campo, ya que de acuerdo a la longitud de las líneas y el espaciamiento de los geófonos se puede estimar la profundidad para cada ensayo.

**Figura 20** Geometría de adquisición de datos sísmicos, a. TRS, b. MASW 1D, c. MASW

2D



*Fuente. Autor*



**Tabla 9** *Parámetros de adquisición de datos para los métodos sísmicos*

<b>PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN</b>			
	<b>TRS</b>	<b>MASW 1D</b>	<b>MASW 2D</b>
Frecuencia geófonos	14.5 Hz	4.5 Hz	4.5 Hz
Separación entre geófonos	3.5m	3.5m	3.5m
Longitud de registro	0.125	1	1
$\Delta t$	0.25 ms	0.5 ms	0.5 ms
Delay	0.025	0.05	0.05
Disparos	9	4	25

*Fuente. Autor*

## **5.2 Segunda fase de procesamiento de datos**

En esta fase se realiza el procesamiento de los datos adquiridos en campo, como lo son los datos geotécnicos, datos sísmicos y datos eléctricos, con los ensayos de SPT. SEV, TRS Y MASW 1D-2D; mediante software especializados.

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

Se procesa mediante el software (Novo SPT), en el cual se analiza el recuento de golpes en el ensayo SPT y se correlaciona el número de golpes, la relación de energía y se hace una corrección para el ensayo teniendo en cuenta los diferentes factores que interviene como se observa en la tabla 10, esto permite 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. (ver tabla 20)

**Tabla 10.** Correcciones del ensayo SPT, perforación 1

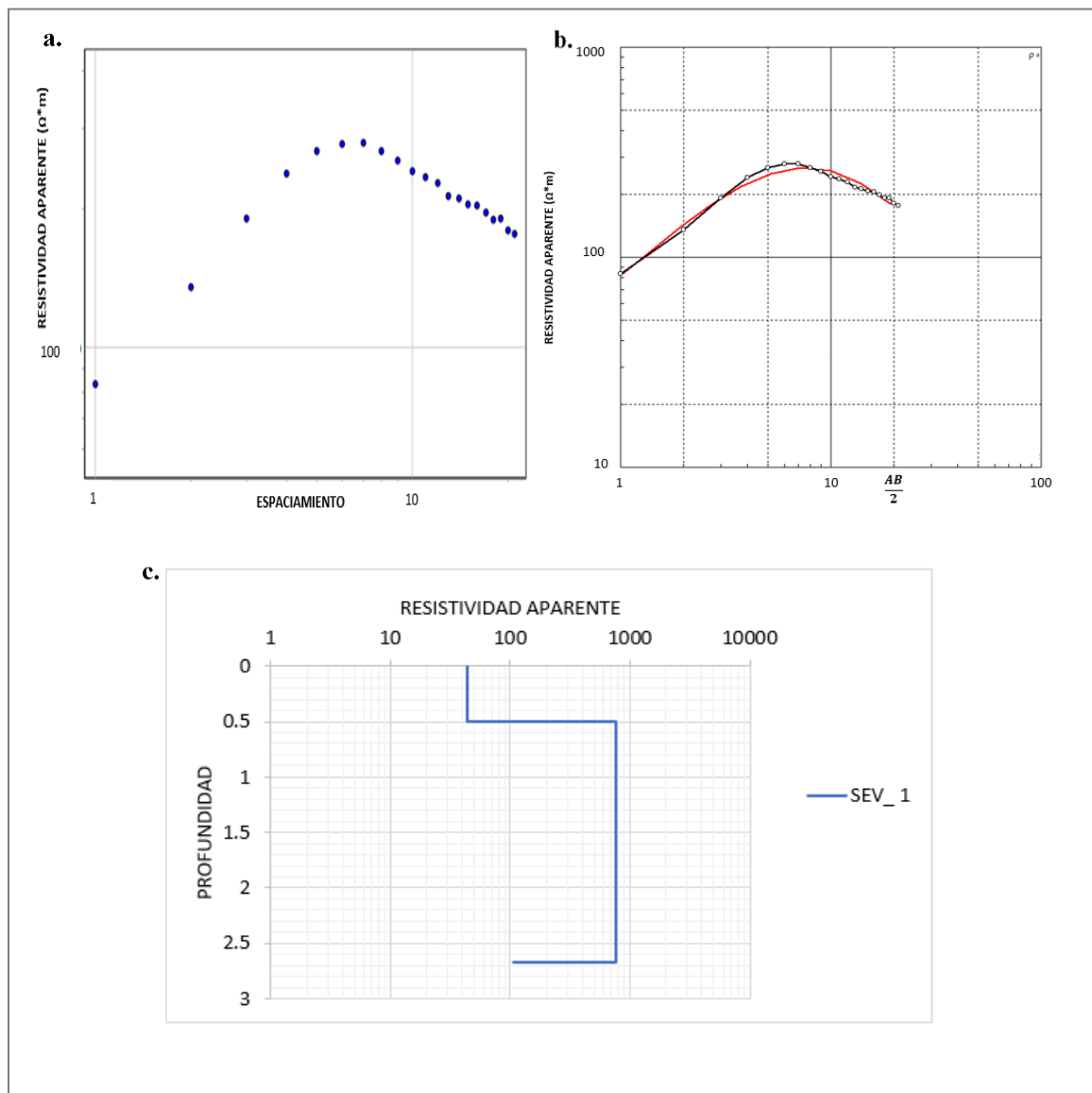
<b>Perforación 1</b>						
<b>N° de muestra</b>	<b># de golpes</b>	<b>C<sub>ER</sub></b>	<b>C<sub>B</sub></b>	<b>C<sub>S</sub></b>	<b>C<sub>R</sub></b>	<b>N<sub>(60)</sub></b>
Muestra 1	10	0.75	1	1	0.75	10
	10	0.75	1	1	0.75	10
Muestra 2	12	0.75	1	1	0.75	12
	9	0.75	1	1	0.75	9
	15	0.75	1	1	0.75	13
Muestra 3	12	0.75	1	1	0.75	10
	14	0.75	1	1	0.75	11
	21	0.75	1	1	0.75	15

*Fuente. Autor*

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

Para el procesamiento de los datos del sondeo eléctrico vertical (SEV) se realizó mediante el software IPI2win, este programa arroja graficas en una dimensión (1D) de las curvas de SEV, en las cuales se relaciona la resistividad aparente en función del espacio de separación entre los electrodos (ver figura 21b); con el fin de determinar el espesor de los estratos y sus respectivas resistividades (ver figura 21c), para correlacionar las resistividades calculadas con algunas propiedades de los suelos(ver tablas 10 y 11). Este método permite identificar el nivel freático con bastante confiabilidad.

**Figura 21** 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



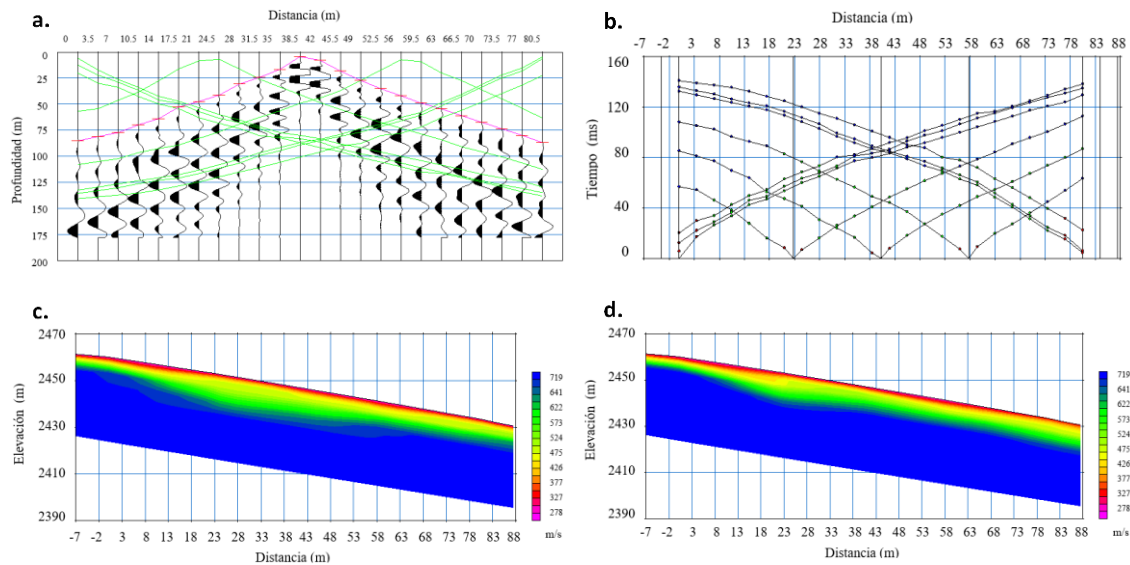
*Fuente. Autor*

### 5.2.3 Tomografía de refracción sísmica (TRS)

Se lleva a cabo mediante el software (Plotrefa y Pickwin), primero se usará Pickwin (Pick Firts Break sor Dispersion Curves). En la Figura 22a se observa el picado de los primeros arribos de las ondas refractadas para el shot 5, se identifica el tren de ondas superficiales, seguidamente se utilizará Plotrefa (Refraction Analysis) en donde se realizara la selección de capas de acuerdo al cambio de pendiente ver Figura 22b, se genera un modelo sísmico inicial, partiendo de los frentes de velocidades estimado por medio de métodos matemáticos (mínimos cuadrados) ver figura 22c, se somete a una corrección la cual permite apreciar el error presentado con la finalidad de obtener un modelo final con mayor precisión a partir de la inversión por tomografía (ver figura 22d).

**Figura 22** *Procesamiento de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS). a) Picado de los primeros arribos de la onda refractada. b) Selección de capas. c) Modelo inicial basado*

en la inversión de mínimos cuadrados. d) Modelo final a partir de la inversión por tomografía



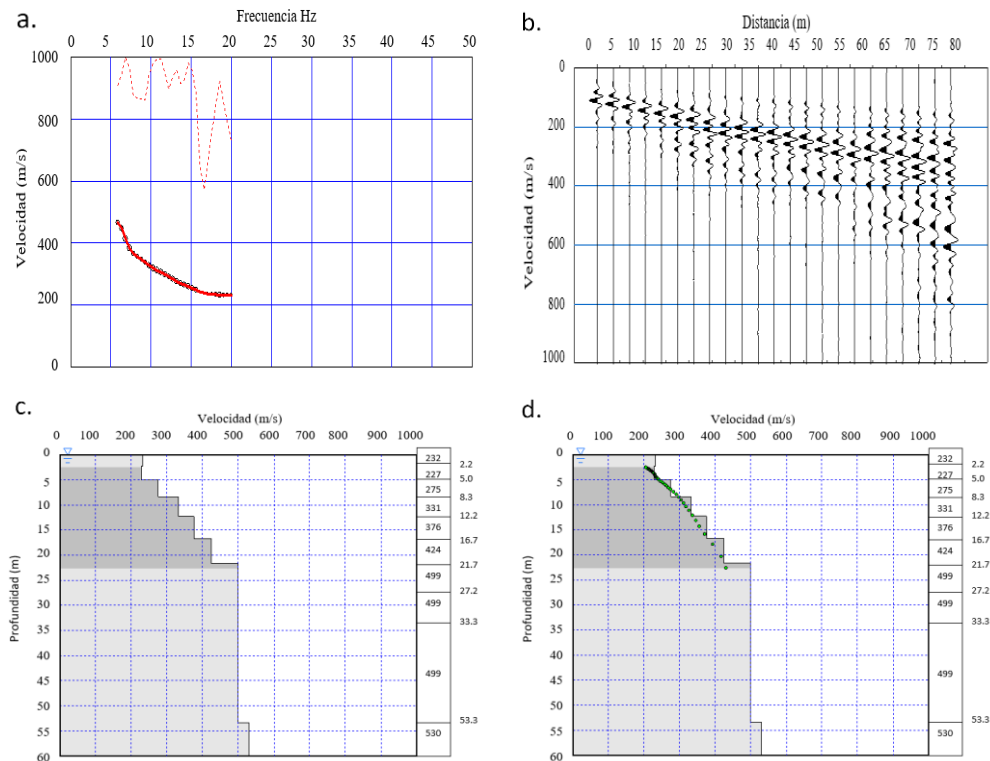
*Fuente. Autor*

## 5.2.4 Análisis multicanal de ondas superficiales MASW

### 5.2.4.1 MASW 1D

Se utiliza el software Surface Wave Analysis Wizard, se cargan los archivos para inspeccionar los datos sísmicos obtenidos (ver figura 23a) con el fin de realizar un filtrado de errores conseguidos en campo y corrección de tiempos; al realizar este paso se procede a picar los primeros arribos para generar la curva de dispersión (ver figura 23b), se genera un modelo inicial (ver figura 23c) y finalmente se genera el modelo final (ver figura 23d) donde se utiliza una inversión por medio de un proceso iterativo. Se puede observar la velocidad de onda ( $V_s$  30m) y la profundidad estimada en el centro de la longitud de la línea.

**Figura 23** Procesamiento de Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D). a) Registro de las ondas superficiales, b) Curva de dispersión, c) Modelo inicial, d) Modelo final.



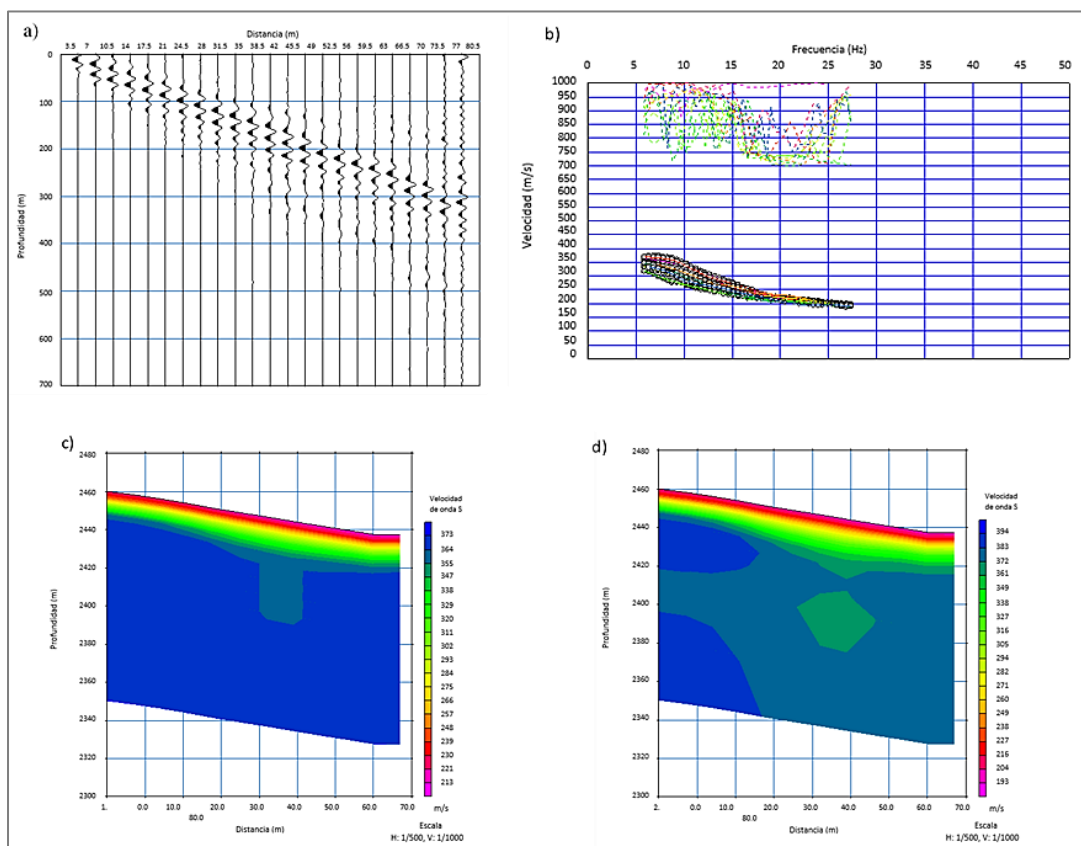
*Fuente. Autor*

### 5.2.4.2 MASW 2D

Se utiliza el software Surface Wave Analysis Wizard, el cual permite realizar un análisis en dos dimensiones (profundidad y largo), contra las velocidades de propagación de la onda S, este permite crear una lista de datos y realizar un filtrado, arroja una gráfica en donde se observa la geometría de adquisición del modelo, estos datos se encuentran en CMP (common middle point) o punto medio común (ver grafica 24a), se hace la

transformada de Fourier, arrojando una curva de dispersión, seguidamente se hace una corrección en donde son eliminados datos de alto modo y baja frecuencia (ver grafica 24b), se genera un modelo inicial en donde se observa los espesores de cada una de las capas, la profundidad, las velocidades aparentes (ver grafica 24c), seguidamente se genera un modelo final en dos dimensiones con sus respectivas velocidades encontradas a lo largo de la línea (ver grafica 24d).

**Figura 24** *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. Autor*

### **5.3 Tercera fase de análisis e interpretación de datos**

Esta fase se mostrará a continuación en el capítulo 4, en el cual se tuvo en cuenta los datos procesados en la fase anterior se procede a correlacionar los datos adquiridos en el área de geotecnia y geofísica para finalmente realizar una caracterización y clasificación del tipo de suelo del área de estudio.




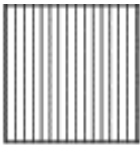
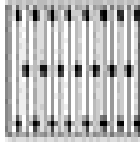
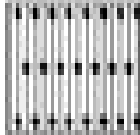
## Capítulo 4

### 6. Resultados

#### 6.1 Ensayo de penetración estándar SPT


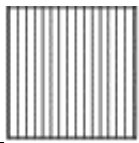
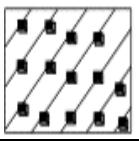
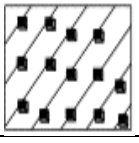

Del procesamiento de los datos que fueron adquiridos en la fase de campo con el ensayo de SPT, se realizaron los laboratorios de contenido de humedad, granulometría, límites de Aterberg, se realizó una caracterización de suelo de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos SUCS, lo que permitió realizar un perfil estratigráfico para cada sondeo realizado en esta investigación como se observa en las tablas de la 11 a la 15, en la que predominó la presencia de limos inorgánicos y arenas arcillosas; posteriormente se realizó una corrección para el SPT teniendo en cuenta los coeficientes de los diferentes factores utilizados para realizar este ensayo; para esta investigación se realizaron 5 sondeos a los cuales se les realizó la respectiva corrección como se puede observar en las tablas de la 16 a la 19, utilizando 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, para finalmente obtener los parámetros estructurales fundamentales mediante el procesamiento de los datos adquiridos en la fase de campo con el software NovoSPT. (ver tabla 20)

**Tabla 11 Perfil estratigráfico SPT 1**

<b>PERFIL ESTRATIGRAFICO SPT1</b>						
<b>ESPESOR</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>w%</b>	<b>GRANULO METRIA % que pasa T 200</b>	<b>LIMITES</b>	<b>CLASIFICACION SUCS</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
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


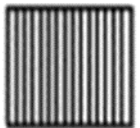
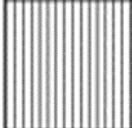
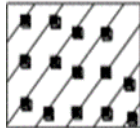
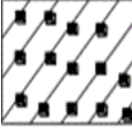
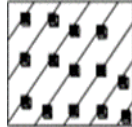
*Fuente. Autor*

*Tabla 12 Perfil estratigráfico SPT 2*

PERFIL ESTRATIGRAFICO SPT 2						
ESPESOR	TIPO DE SUELO	w%	GRANULO METRIA % que pasa T 200	LIMITES	CLASIFICACION SUCS	OBSERVACIONES
50					C.O	Capa Orgánica
40 Cm		17.92	51.85	WL= 40 WP= 36.3 IP= 3.7	ML	Limo Inorgánico, Limos arenosos o arcillosos
96		19.05	38.62	WL= 37 WP= 18.1 IP= 18.9	SC	Arenas arcillosas
120		16.56	47.49	WL= 35 WP= 26.9 IP= 8.09	SC	Arenas arcillosas
60		16.04	49.37	WL= 39 WP= 31.8 IP= 7.23	SC	Arenas arcillosas


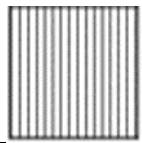
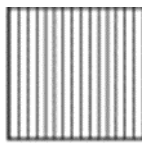
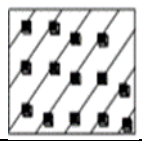
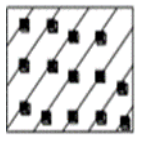
*Fuente. Autor*

**Tabla 13 Perfil estratigráfico SPT 3**

<b>PERFIL ESTRATIGRAFICO SPT3</b>						
<b>ESPESOR</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>w%</b>	<b>GRANULO METRIA % que pasa T 200</b>	<b>LIMITES</b>	<b>CLASIFICACION SUCS</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
52		32.02			C.O	Capa Orgánica
35 Cm		28.09	61.2	WL= 64 WP= NP IP= NP	MH	Limo Inorgánico
48		22.06	61.87	WL= 42 WP= 38.53 IP= 3.47	ML	Limo Inorgánico, Limos arenosos o arcillosos
116		22.73	48.67	WL= 37 WP= 7.1 IP= 29.94	SC	Arenas arcillosas
98		14.08	38.79	WL= 33 WP= 23.2 IP= 9.8	SC	Arenas arcillosas
108		16.03	43.89	WL= 31 WP= 23.8 IP= 7.21	SC	Arenas arcillosas


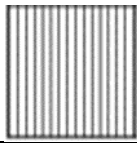
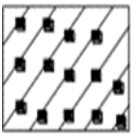
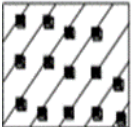
*Fuente. Autor*

**Tabla 14 Perfil estratigráfico SPT 4**

<b>PERFIL ESTRATIGRAFICO SPT 4</b>						
<b>ESPESOR</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>w%</b>	<b>GRANULO METRIA % que pasa T 200</b>	<b>LIMITES</b>	<b>CLASIFICACION SUCS</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
51 Cm		29.94			C.O	Capa Orgánica
62 Cm		17.5	68.45	WL= 41 WP= 33.9 IP= 7.1	ML	Limo Inorgánico, Limos arenosos o arcillosos
37 Cm		19.37	55.88	WL= 42 WP= 27 IP= 14.97	ML	Limo Inorgánico, Limos arenosos o arcillosos
171 Cm		15.96	45.7	WL= 33 WP= 15.6 IP= 17.36	SC	Arenas arcillosas
90 Cm		13.02	47.51	WL= 35 WP= 16.3 IP= 18.73	SC	Arenas arcillosas

*Fuente. Autor*

**Tabla 15 Perfil estratigráfico SPT 5**

PERFIL ESTRATIGRAFICO SPT 5						
ESPESOR	TIPO DE SUELO	w%	GRANULO METRIA % que pasa T 200	LIMITES	CLASIFICACION SUCS	OBSERVACIONES
48		13.32			C.O	Capa Orgánica
40 Cm		11.05	69.33	WL= 31 WP= 23.2 IP= 7.78	ML	Limo Inorgánico, Limos arenosos o arcillosos
120		16	48.34	WL= 38 WP= 28.6 IP= 9.41	SC	Arenas arcillosas
158		13.21	36.11	WL= 46 WP= NP IP= NP	SC	Arenas arcillosas

*Fuente. Autor*

**Tabla 16** 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. Autor***Tabla 17** Correcciones del ensayo SPT, perforación 3

<b>Perforación 3</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	11	0.75	1	1	0.75	10
	12	0.75	1	1	0.75	12
Muestra 2	7	0.75	1	1	0.75	7
Muestra 3	11	0.75	1	1	0.75	10
	11	0.75	1	1	0.75	10
	9	0.75	1	1	0.75	7
Muestra 4	17	0.75	1	1	0.75	13
	17	0.75	1	1	0.75	13
Muestra 5	20	0.75	1	1	0.75	14
	21	0.75	1	1	0.75	15

*Fuente. Autor*

**Tabla 18** Correcciones del ensayo SPT, perforación 4

<b>Perforación 4</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	2
	12	0.75	1	1	0.75	14
Muestra 2	10	0.75	1	1	0.75	12
Muestra 3	7	0.75	1	1	0.75	9
	10	0.75	1	1	0.75	11
	12	0.75	1	1	0.75	12
	18	0.75	1	1	0.75	16
Muestra 4	18	0.75	1	1	0.75	15
	25	0.75	1	1	0.75	21

*Fuente. Autor***Tabla 19** Correcciones del ensayo SPT, perforación 5

<b>Perforación 5</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	10
	6	0.75	1	1	0.75	14
Muestra 2	9	0.75	1	1	0.75	12
	8	0.75	1	1	0.75	10
	11	0.75	1	1	0.75	10
Muestra 3	12	0.75	1	1	0.75	10
	12	0.75	1	1	0.75	11
	29	0.75	1	1	0.75	15

*Fuente. Autor*



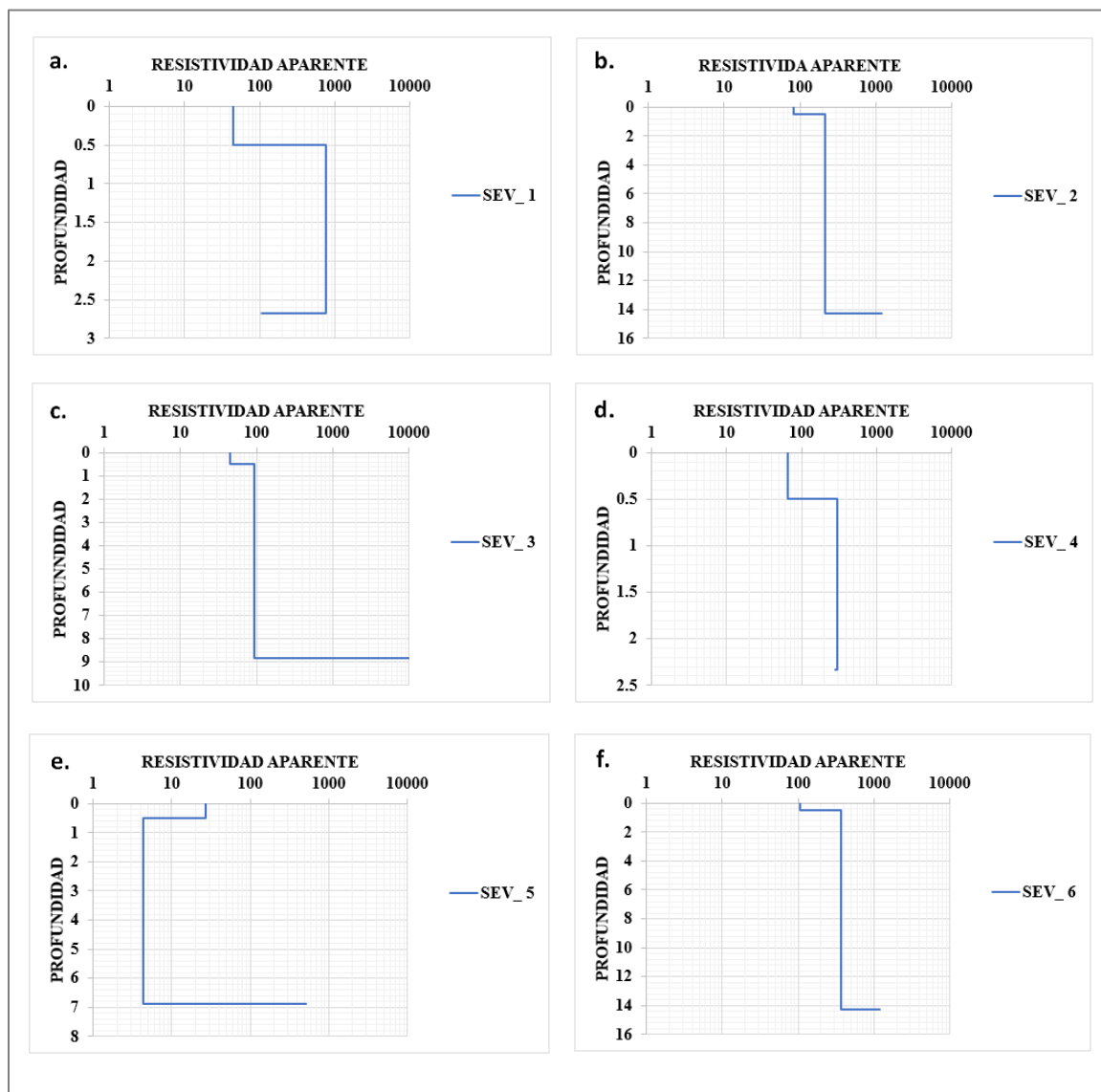
**Tabla 20** *Parámetros del suelo (NovoSPT)*

<b>SPT</b>	<b>Estrato</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Peso específico (Kn/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ángulo de fricción interno</b>	<b>Módulo de Young (Mpa)</b>	<b>Módulo de corte (Mpa)</b>
Sondeo 1	1	0-0.91	17.52	32.10	4.47	71.67
	2	0.91-2.29.	17.61	32.20	9.07	78.33
	3	2.29-3.66	17.70	32.08	5.99	86.89
Sondeo 2	1	0-0.91	16.98	29.58	3.40	52.67
	2	0.91-1.83.	17.52	30.58	4.05	64.83
	3	1.83-2.74	17.52	31.15	4.85	74.67
	4	2.74-3.66	17.91	32.98	7.28	98.83
Sondeo 3	1	0-0.91	17.52	32.8	4.85	77.50
	2	0.91-1.37	16.98	29.85	3.67	58.00
	3	1.37-2.74	17.52	30.95	4.54	71.33
	4	2.74-3.66	17.80	32.45	6.33	91.17
	5	3.66-4.57	18.07	33.275	7.72	103.50
Sondeo 4	1	0-0.91	17.65	33.48	7.82	75.50
	2	0.91-1.37	17.52	32.30	7.37	71.67
	3	1.37-3.2	17.72	31.96	8.14	74.75
	4	3.2-3.66	18.18	34.45	13.02	105.00
Sondeo 5	1	0-0.91	17.52	33.18	5.13	81.33
	2	0.91-2.29	17.52	31.77	4.90	77.78
	3	2.29-3.66	17.70	32.03	5.99	86.89

**Fuente.** *Autor*

## 6.2 Sondeo eléctrico vertical SEV

**Figura 25** Sondeo Eléctrico Vertical (línea 1), a. SEV\_1, b. SEV\_2, c. SEV\_3, d. SEV\_4, e. SEV\_5, f. SEV\_6



*Fuente. Autor*

De los datos procesados para el sondeo eléctrico vertical (SEV) para la línea 1 (ver figura 25) y teniendo en cuenta la tabla de resistividad de los materiales (ver tablas 10 y 11) 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  $\Omega\text{m}$ .

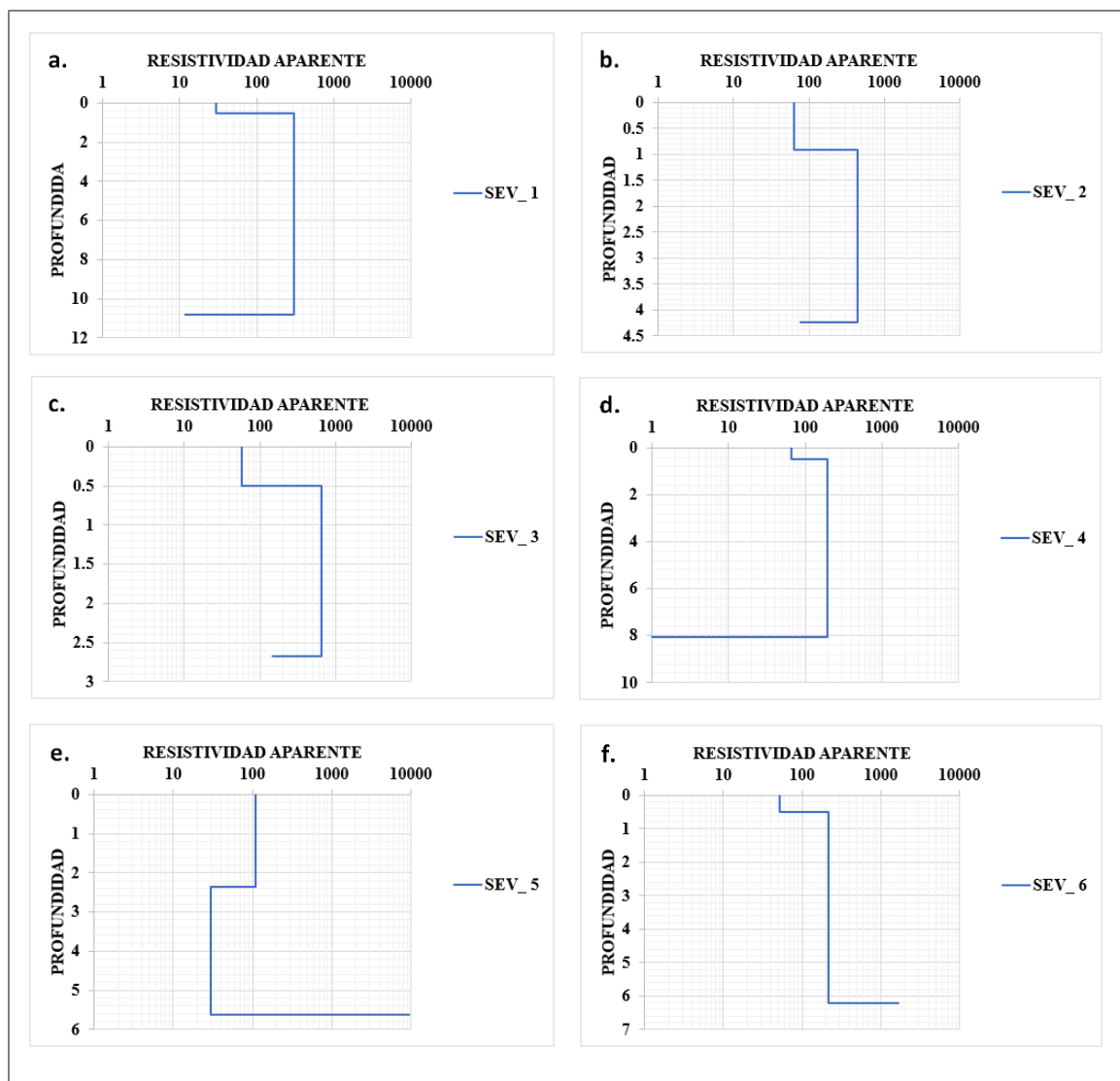
SEV3: Hay presencia de materiales con resistividades de 44.2  $\Omega\text{m}$ , 93.6  $\Omega\text{m}$ .

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 26** Sondeo Eléctrico Vertical (línea 2), a. SEV\_1, b. SEV\_2, c. SEV\_3, d. SEV\_4, e. SEV\_5, f. SEV\_6



*Fuente. Autor*

De los datos procesados para el sondeo eléctrico vertical (SEV) para la línea 2 (ver figura 26) y teniendo en cuenta la tabla de resistividad de los materiales (ver tablas 10 y 11) se obtuvieron los siguientes resultados:

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  $62.6\Omega\text{m}$ ,  $442\Omega\text{m}$ ,  $76.6\Omega\text{m}$ .

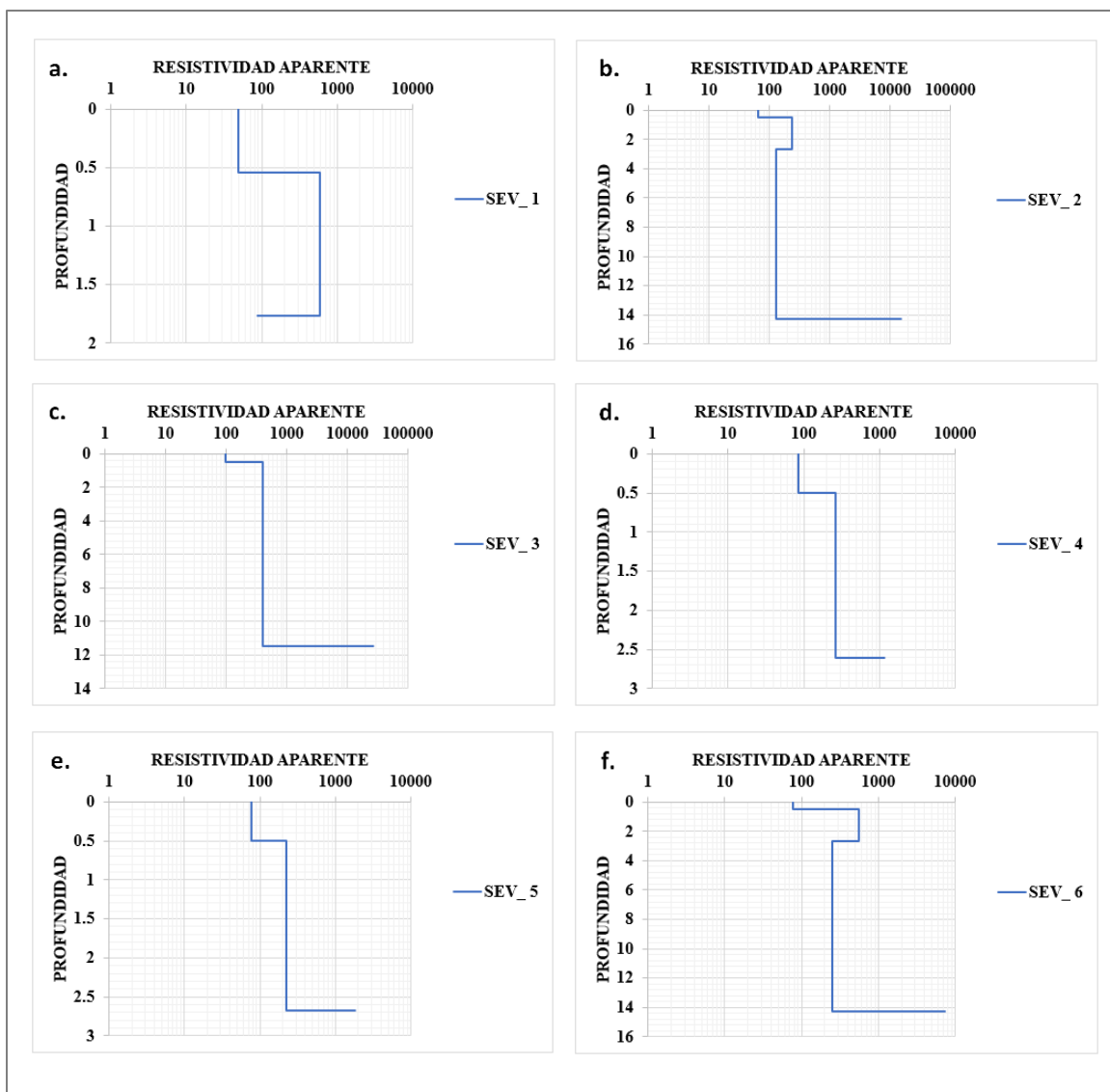
SEV3: Hay presencia de materiales con resistividades de  $56.6\Omega\text{m}$ ,  $642\Omega\text{m}$ ,  $147\Omega\text{m}$ .

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  $52\Omega\text{m}$ ,  $215\Omega\text{m}$ ,  $1680\Omega\text{m}$ .

**Figura 27** Sondeo Eléctrico Vertical (línea 3) a. SEV\_1, b. SEV\_2, c. SEV\_3, d. SEV\_4, e. SEV\_5, f. SEV\_6



*Fuente. Autor*

De los datos procesados para el sondeo eléctrico vertical (SEV) para la línea 3 (ver figura 27) y teniendo en cuenta la tabla de resistividad de los materiales (ver tablas 10 y 11) se obtuvieron los siguientes resultados:

SEV1: Hay presencia de materiales con resistividades de  $49.2\Omega\text{m}$ ,  $586\Omega\text{m}$ ,  $87.9\Omega\text{m}$ .

SEV2: Hay presencia de materiales con resistividades de  $64.1\Omega\text{m}$ ,  $240\Omega\text{m}$ ,  $132\Omega\text{m}$ .

SEV3: Hay presencia de materiales con resistividades de  $97.9\Omega\text{m}$ ,  $409\Omega\text{m}$ ,  $26349\Omega\text{m}$ .

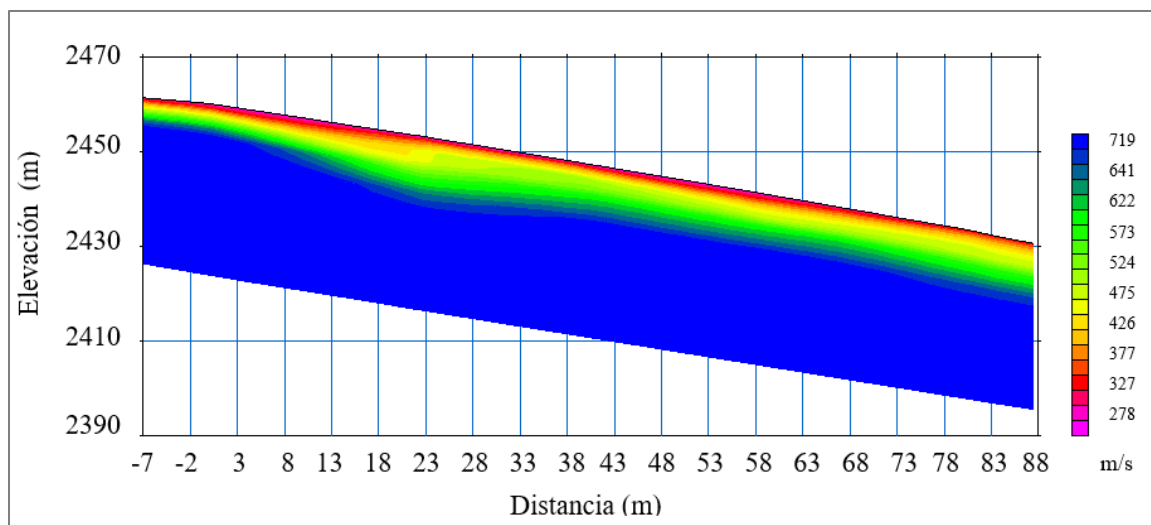
SEV4: Hay presencia de materiales con resistividades de  $85.8\Omega\text{m}$ ,  $259\Omega\text{m}$ ,  $1168\Omega\text{m}$ .

SEV5: Hay presencia de materiales con resistividades de  $76.8\Omega\text{m}$ ,  $224\Omega\text{m}$ ,  $1809\Omega\text{m}$ .

SEV6: Hay presencia de materiales con resistividades de  $77.7\Omega\text{m}$ ,  $559\Omega\text{m}$ ,  $252\Omega\text{m}$   $7450\Omega\text{m}$ .

### 6.3 Tomografía de refracción sísmica TRS

*Figura 28 Tomografía de Refracción Sísmica (modelo final línea 1)*



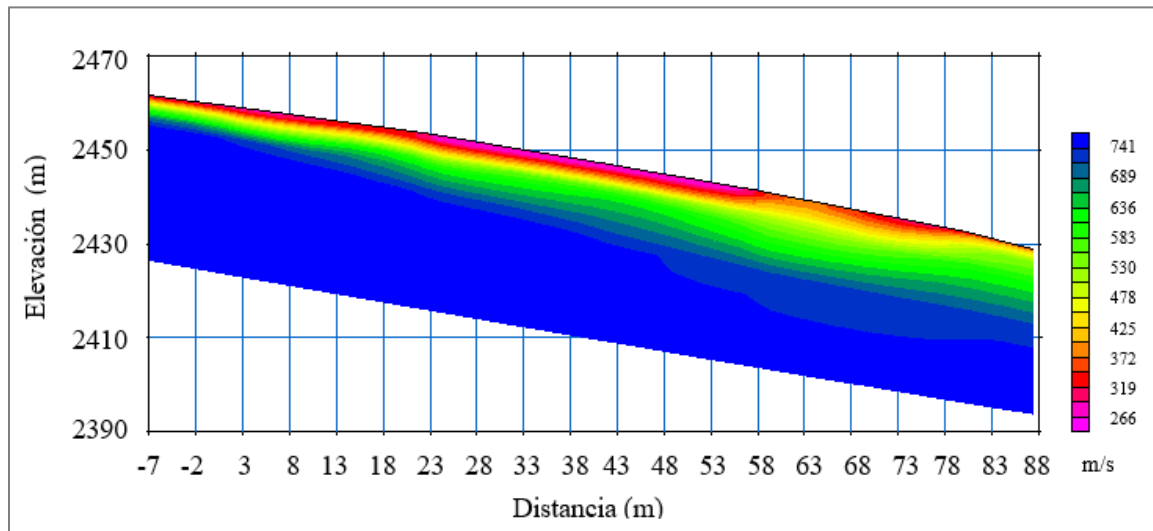
*Fuente. Autor*

En el perfil sísmico de la línea 1 observado en la figura 28 muestra la presencia de 3 capas:

- Capa 1 presenta valores de velocidad de onda p ( $V_p$ ) entre 278 m/s y 475 m/s con un espesor variable de 1.7 m a 2.3m.
- Capa 2 presenta valores de  $V_p$  entre 475 m/s y 719 m/s con un espesor variable de 3 m a 9.8 m.
- Capa 3 con velocidades mayores a 719 m/s como se muestra en la figura 28.



**Figura 29** Tomografía de Refracción Sísmica (modelo final línea 2)

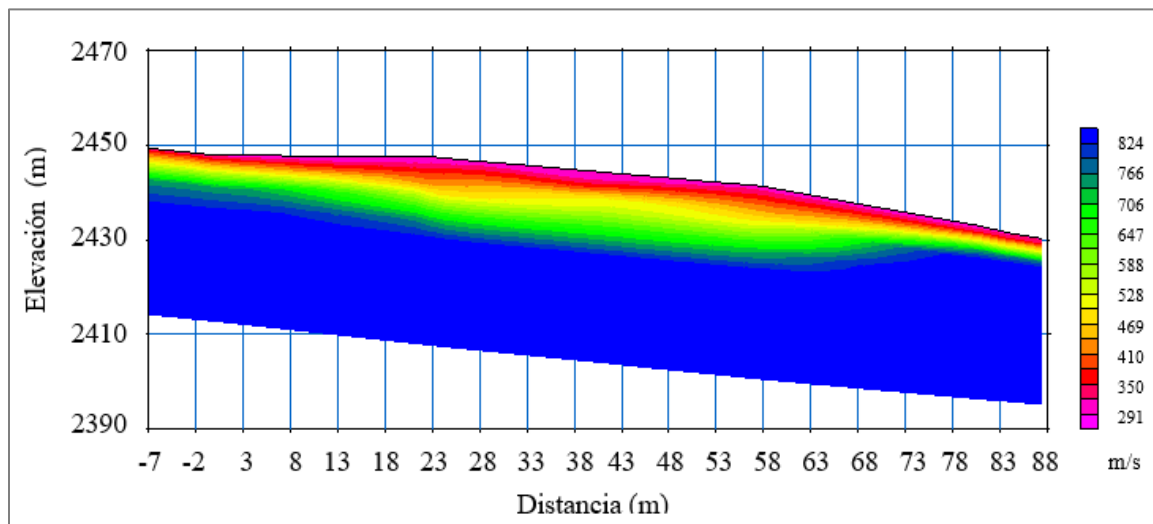


*Fuente. Autor*

En el perfil sísmico de la línea 2 observado en la figura 29 muestra la presencia de 3 capas:

- Capa 1: presenta valores de velocidad de onda p ( $V_p$ ) entre 266 m/s y 636 m/s con un espesor variable de 0.6 m a 4.24 m.
- Capa 2: presenta valores de  $V_p$  entre 636 m/s y 741m/s con un espesor variable de 5.9 m a 15.8 m.
- Capa 3: con velocidades mayores a 741 m/s como se muestra en la figura 29.

**Figura 30** Tomografía de Refracción Sísmica (modelo final línea 3)



**Fuente. Autor**

En el perfil sísmico de la línea 3 observado en la figura 30 muestra la presencia de 3 capas

- Capa 1: presenta valores de velocidad de onda p ( $V_p$ ) entre 291 m/s y 469 m/s con un espesor variable de 0.6 m a 3.5 m.
- Capa 2 presenta valores de  $V_p$  entre 469 m/s y 824 m/s con un espesor variable de 0.5 m a 12.3 m.
- Capa 3: con velocidades mayores a 824 m/s como se muestra en la figura 30.

## 6.4 Análisis multicanal de ondas superficiales MASW

### 6.4.1 MASW 1D

Del ensayo de análisis multicanal de ondas superficiales MASW 1D para cada una de las 3 líneas trabajadas en campo se observa el rango de velocidades, para la línea 1 se muestran velocidades entre 230 m/s y 510 m/s alcanzando una profundidad máxima de 53.3m; para la línea 2 se muestran velocidades entre 162.3 m/s y 547.8 m/s, alcanzando una profundidad máxima de 48.6; para la línea 3 se muestran velocidades entre 250.8 m/s y 638 m/s alcanzando una profundidad máxima de 48.6. (ver tabla 21)

**Tabla 21.** Velocidades de onda S MASW 1D

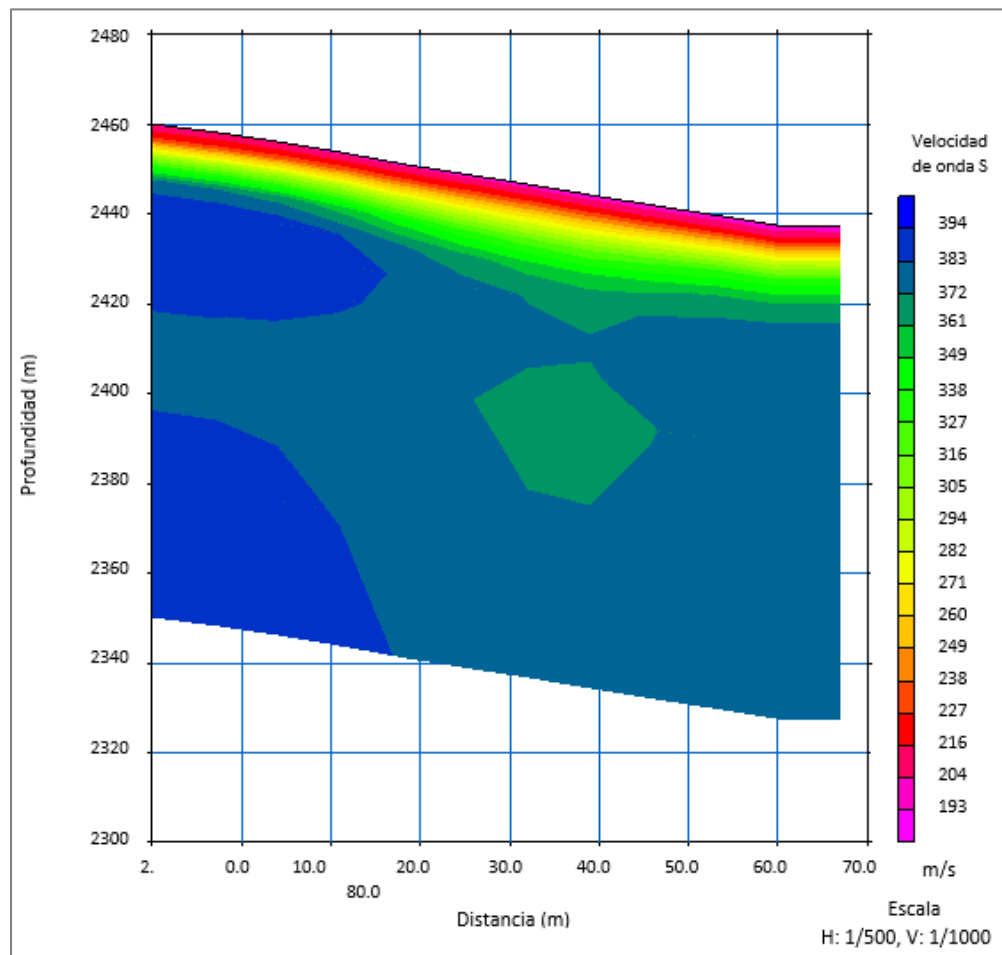
		Velocidades de onda de corte (onda S) MASW 1D													
<b>Línea 1</b>	Profundidad	2.2	5	8.3	12.2	16.7	21.7	27.2	33.3	53.3					
	velocidad	252.8	230.0	272.8	329.0	378.3	435.0	510.8	510.3	510.0					
<b>Línea 2</b>	Profundidad	1.4	3.1	4.9	7	9.3	11.9	14.6	17.6	20.8	24.2	27.8	31.6	35.7	48.6
	velocidad	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
<b>Línea 3</b>	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	230.8	228.5	228.5	250.8	292.3	315.5	372.8	398.8	428.5	461.0	492.8	552.8	590.0	638.0

*Fuente. Autor*

### 6.4.2 MASW 2D

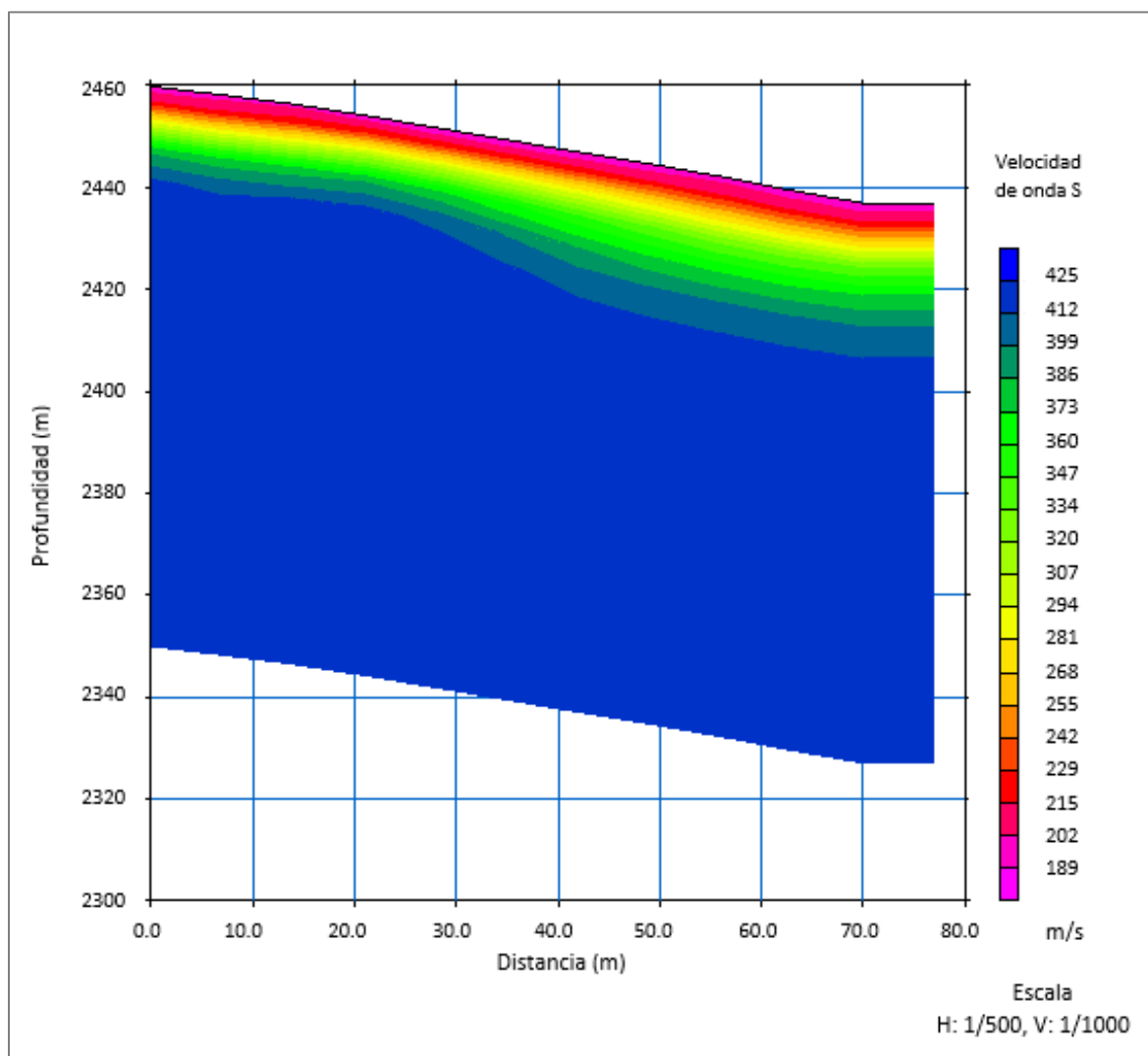
Se obtuvo un modelo para cada una de las 3 líneas procesadas estos modelos se encuentran la elevación (m.s.n.m.) en función de la distancia (m), cada línea tiene una longitud de 84 m como se puede observar en la figura 20c, para la línea 1 se observa un rango de velocidades de onda s entre 193 m/s y 394 m/s (ver figura 31), para la línea 2 se observa un rango de velocidades de onda s entre 189 m/s y 425 m/s (ver figura 32), para la línea 3 se observa un rango de velocidades de onda s entre 171 m/s y 355 m/s (ver figura 33).

**Figura 31** Análisis multicanal de ondas superficiales, MASW 2D (modelo final línea 1)



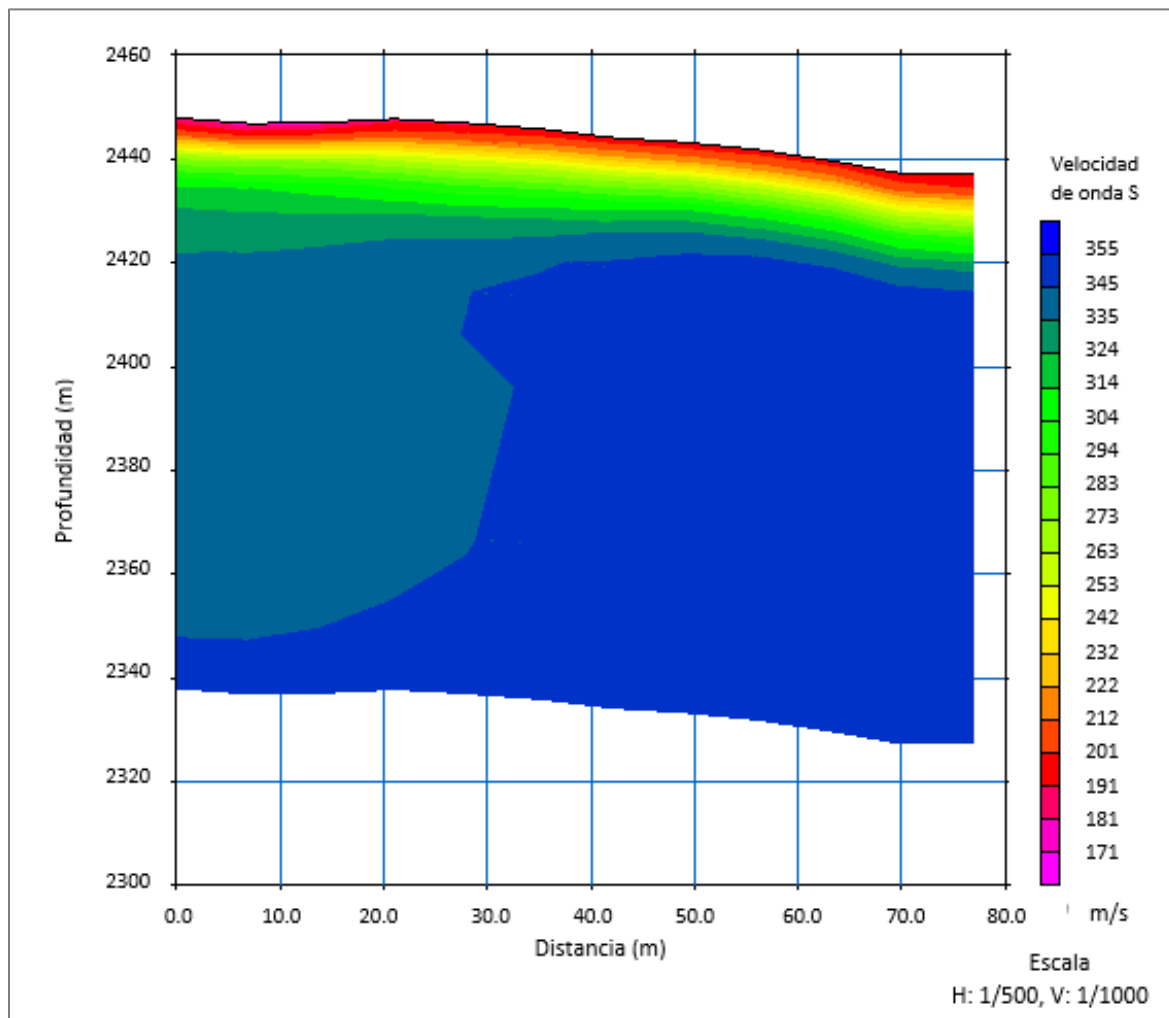
*Fuente. Autor*

**Figura 32** Análisis multicanal de ondas superficiales, MASW 2D (modelo final línea 2)



**Fuente.** Autor

**Figura 33** Análisis multicanal de ondas superficiales, MASW 2D (modelo final línea3)



*Fuente. Autor*

## 6.5 Correlación geotécnica por métodos geofísicos.

Con los datos obtenidos después de realizar el procesamiento en cada uno de los softwares se procede a correlacionar los datos geotécnicos como el peso específico, el coeficiente Poisson, el módulo de corte, el módulo de Young con datos los geofísicos como lo son las velocidades de onda P y S para cada una de las líneas trabajadas en esta investigación como se puede observar en las tablas de la 22 a la 24.

**Tabla 22** Correlación geotécnica por métodos geofísicos para la línea 1

Línea 1									
Profundidad promedio (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Peso específico (kn/m <sup>3</sup> )	Coeficiente de Poisson (kn/m <sup>2</sup> )	Módulo de corte (kn/m <sup>2</sup> )	Módulo de Young (kn/m <sup>2</sup> )	Capacidad portante (kn/m <sup>2</sup> )	Capacidad de carga (kn/m <sup>2</sup> )	
								n	q
2.2	252.8	439.7	17.1	0.25	111584.89	279657.35	367.51	4	1470.04
5.0	230.0	532.5	16.7	0.39	90207.91	249933.12	292.92	4	1171.68
8.3	272.8	533.3	17.5	0.32	132436.22	350380.61	441.19	4	1764.78
12.2	329.0	699.9	18.3	0.36	201858.82	548332.06	691.63	4	2766.51
16.7	378.3	756.4	19.0	0.33	276368.62	736930.69	966.96	4	3867.85
21.7	435.0	756.4	19.6	0.25	378405.81	948249.99	1352.00	4	5408.00
27.2	510.8	756.4	20.4	0.08	543152.11	1174187.96	1987.95	4	7951.79

*Fuente. Autor*

**Tabla 23** Correlación geotécnica por métodos geofísicos para la línea 2

Línea 2									
Profundidad promedio (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Peso específico (kn/m <sup>3</sup> )	Coeficiente de Poisson (kn/m <sup>2</sup> )	Módulo de corte (kn/m <sup>2</sup> )	Módulo de Young (kn/m <sup>2</sup> )	Capacidad portante (kn/m <sup>2</sup> )	Capacidad de carga (kn/m <sup>2</sup> )	
								n	q
1.4	162.3	287.3	15.3	0.27	41169.31	104202.16	126.87	4	507.49
3.1	183.0	296.1	15.8	0.19	53935.15	128463.61	169.23	4	676.93
4.9	243.3	506.2	17.0	0.35	102370.95	276358.09	335.23	4	1340.92

7.0	287.5	623.0	17.7	0.36	149036.32	406775.44	500.42	4	2001.68
9.3	317.3	643.8	18.1	0.34	186064.98	498494.91	634.06	4	2536.24
11.9	350.5	643.8	18.6	0.29	232758.22	600218.54	805.11	4	3220.43
14.6	384.3	744.2	19.0	0.32	286329.00	754870.12	1004.18	4	4016.72
17.6	425.3	744.2	19.5	0.26	359684.38	904609.20	1280.77	4	5123.09
20.8	457.5	745.2	19.9	0.20	423874.16	1015173.77	1525.95	4	6103.82
24.2	483.0	745.7	20.2	0.14	478892.47	1090509.79	1738.10	4	6952.42

*Fuente. Autor*

**Tabla 24** Correlación geotécnica por métodos geofísicos para la línea 3

<b>Línea 3</b>									
Profundidad promedio (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Peso específico (kn/m <sup>3</sup> )	coeficiente de Poisson (kn/m <sup>2</sup> )	Módulo de corte (kn/m <sup>2</sup> )	Módulo de Young (kn/m <sup>2</sup> )	Capacidad portante (kn/m <sup>2</sup> )	Capacidad de carga (kn/m <sup>2</sup> )	
								n	q
1.4	219.0	291	16.5	-0.15	80789.74	137014.54	260.42	4	1041.67
3.1	228.5	325	16.7	0.01	88889.60	180198.24	288.36	4	1153.43
4.9	228.5	467.9	16.7	0.34	88889.60	238838.29	288.36	4	1153.43
7.0	250.8	538.9	17.1	0.36	109608.42	298516.10	360.57	4	1442.28
9.3	292.3	541.5	17.8	0.29	154693.41	400458.47	520.71	4	2082.82
11.9	315.5	541.5	18.1	0.24	183698.47	456665.98	625.46	4	2501.85
14.6	372.8	866.1	18.9	0.39	267410.07	741415.05	933.57	4	3734.26
17.6	398.8	866.1	19.2	0.37	311211.80	849893.09	1097.53	4	4390.11
20.8	428.5	866.1	19.6	0.34	365802.21	978838.78	1304.02	4	5216.09
24.2	461.0	866.1	19.9	0.30	431205.26	1123143.56	1554.12	4	6216.49

*Fuente. Autor*



## **7. Análisis de resultados**

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

De acuerdo a los datos procesados para cada una de las 3 líneas como se observa en las tablas de la 11 a 15 en donde se muestra el perfil estratigráfico para cada una ellas de se procede a realizar su análisis.

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

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

Sondeo 3: Se obtuvo una profundidad máxima alcanzada de 4.57 m, ya que se presentó rechazo por presencia de un material rocoso no homogéneo, después de realizados los laboratorios se obtuvo un limo inorgánico y arenas arcillosas.

Sondeo 4: Se obtuvo una profundidad máxima alcanzada de 4.11 m, ya que se presentó rechazo por presencia de un material rocoso no homogéneo, después de realizados los laboratorios se obtuvo un limo inorgánico y arenas arcillosas.

Sondeo 5: Se obtuvo una profundidad máxima alcanzada de 3.66 m, ya que se presentó rechazo por presencia de un material rocoso no homogéneo, después de realizados los laboratorios se obtuvo un limo inorgánico y arenas arcillosas.

## 7.2 Sondeo eléctrico vertical (SEV)

De los datos procesados para el sondeo eléctrico vertical (SEV) para cada una de las 3 líneas mostradas en las figuras de la 25 a la 27 y teniendo en cuenta las tabla 10 y 11 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  $\Omega\text{m}$  los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa.

SEV2: Hay presencia de materiales con resistividades de 81.5  $\Omega\text{m}$ , 214  $\Omega\text{m}$ , 1217  $\Omega\text{m}$  los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa, arena silíceo.

SEV3: Hay presencia de materiales con resistividades de 44.2  $\Omega\text{m}$ , 93.6  $\Omega\text{m}$ , los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa.

SEV4: Hay presencia de materiales con resistividades de 65.4  $\Omega\text{m}$ , 304  $\Omega\text{m}$ , 279  $\Omega\text{m}$  los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa.

SEV5: Hay presencia de materiales con resistividades de 26.9  $\Omega\text{m}$ , 524  $\Omega\text{m}$  los cuales son interpretados como limo, basamento de roca fracturada.

SEV6: Hay presencia de materiales con resistividades de 107  $\Omega\text{m}$ , 370  $\Omega\text{m}$ , 1200  $\Omega\text{m}$  los cuales son 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 $\Omega\text{m}$  los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa.

SEV2: Hay presencia de materiales con resistividades de 62.6 $\Omega$ m, 442 $\Omega$ m, 76.6 $\Omega$ m los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa.

SEV3: Hay presencia de materiales con resistividades de 56.6  $\Omega$ m, 642  $\Omega$ m, 147  $\Omega$ m, los cuales son interpretados como limo, arena silíceo, arena arcillosa.

SEV4: Hay presencia de materiales con resistividades de 65.9  $\Omega$ m, 194 $\Omega$ m, los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa.

SEV5: Hay presencia de materiales con resistividades de 109  $\Omega$ m, 29.5  $\Omega$ m, 9479  $\Omega$ m, los cuales son interpretados como arena arcillosa, limo.

SEV6: Hay presencia de materiales con resistividades de 52  $\Omega$ m, 215 $\Omega$ m, 1680  $\Omega$ m los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa, grava no saturada.

- Línea 3

SEV1: Hay presencia de materiales con resistividades de 49.2 $\Omega$ m, 586 $\Omega$ m, 87.9 $\Omega$ m, los cuales son interpretados como limo, grava no saturada, arena arcillosa.

SEV2: Hay presencia de materiales con resistividades de 64.1 $\Omega$ m, 240 $\Omega$ m, 132 $\Omega$ m, los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa.

SEV3: Hay presencia de materiales con resistividades de 97.9 $\Omega$ m, 409 $\Omega$ m, 26349 $\Omega$ m, los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa, basamento de roca sana.

SEV4: Hay presencia de materiales con resistividades de 85.8  $\Omega$ m, 259 $\Omega$ m, 1168  $\Omega$ m los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa, basamento de roca fracturada.

SEV5: Hay presencia de materiales con resistividades de 76.8  $\Omega\text{m}$ , 224 $\Omega\text{m}$ , 1809 $\Omega\text{m}$ , los cuales son interpretados como limo, arena arcillosa, basamento de roca fracturada.

SEV6: Hay presencia de materiales con resistividades de 77.7 $\Omega\text{m}$ , 559 $\Omega\text{m}$ , 252 $\Omega\text{m}$  7450  $\Omega\text{m}$  los cuales son interpretados como limo, grava no saturada, arena arcillosa.

### 7.3 Tomografía de refracción sísmica (TRS)

Del procesamiento de Tomografía de Refracción Sísmica y con la tabla de rango de velocidades de la onda P (ASTM D5777) se clasificaron los estratos presentes en el subsuelo para cada línea.

- Perfil sísmico de la línea 1: muestra la presencia de 3 capas:

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. Se clasifica como una grava o arena seca.

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, Se clasifica como una grava o arena seca.

Capa 3 con velocidades mayores a 719 m/s como se muestra en la figura 25 se clasifica como una grava o arena seca.

- Perfil sísmico de la línea 2: muestra la presencia de 3 capas:

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. Se clasifica como una grava o arena seca.

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. Se clasifica como una grava o arena seca.

Capa 3: con velocidades mayores a 741 m/s como se muestra en la figura 27. Se clasifica como una grava o arena seca.

- Perfil sísmico de la línea 3: muestra la presencia de 3 capas

Capa 1: presenta valores de velocidad de onda p ( $V_p$ ) entre 291 m/s y 469 m/s con un espesor variable de 0.6 m a 3.5 m. Se clasifica como una grava o arena seca.

Capa 2 presenta valores de  $V_p$  entre 469 m/s y 766 m/s con un espesor variable de 0.5 m a 12.3 m Se clasifica como una grava o arena seca

Capa 3: con velocidades mayores a 766 m/s como se muestra en la figura 26, se clasifica como una grava o arena seca.

## **7.4 ANALISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)**

MASW 1D y MASW 2D sirven 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

### **7.4.1 MASW 1D**

Línea 1: se identificaron 3 capas, con una velocidad promedio a los 30 m de 357.225 m/s, alcanzando una profundidad aproximada de 53.3 m, en la cual se presenta mayor certidumbre hasta los 21.7 m, a partir de allí hasta los 53.3 m se presenta otro

cambio de velocidad, este cambio presenta un alto grado de incertidumbre, finalmente se clasifica como un perfil de suelo tipo D.

Línea 2: se identificaron 3 capas, con una velocidad de onda de corte  $V_s$  a 30 m promedio de 344.1 m/s, alcanzando una profundidad aproximada de 48.6 m, se clasifico como un perfil de suelo tipo D.

Línea 3: se identificaron 3 capas, con una velocidad de onda de corte  $V_s$  a 30 m promedio de 349.4 m/s, alcanzando una profundidad aproximada de 48.6 m, se clasifico como un perfil de suelo tipo D.

#### **7.4.2 MASW 2D**

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

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

Línea 3: Tiene una velocidad promedio de 293.81 m/s, alcanzando una profundidad aproximada de 23 m, se clasifico como un perfil de suelo tipo D.

## Conclusiones

- Las técnicas geofísicas son un gran complemento a la hora de realizar estudios de suelos ya que mediante la aplicación de estas técnicas que son consideradas como no invasivas se puede alcanzar mayores profundidades y aplicando la física se puede estudiar la estructura y composición de las diferentes capas del subsuelo.
- La principal ventaja de la caracterización geotécnica aplicando las técnicas geofísicas es evitar la manipulación de los suelos por medio de sondeos o perforaciones, permitiendo abarcar gran extensión de terreno optimizando el tiempo y el costo de aplicación.
- Los parámetros dinámicos que se obtuvieron a partir de los ensayos directos mediante la aplicación del SPT fueron el peso específico “ $\gamma$ ” varía entre 16.98 Kn/m<sup>2</sup> y 20 Kn/m<sup>2</sup>, el coeficiente de Poisson “ $\nu$ ” oscila entre 0.2 – 0.4, el ángulo de fricción “ $\phi$ ” que varían entre 29.5 - 34, el módulo de corte “ $G$ ” oscila entre 50 – 100 Kpa, el módulo de Young “ $E$ ” oscila entre 4.5 – 9 Kpa.
- En la zona de estudio se realizaron 5 sondeos para el ensayo de SPT permitiendo extraer muestras de suelo alcanzando una profundidad máxima de 4.57 m; estas muestras fueron llevadas al laboratorio para su respectivo análisis en el cual se encontró la presencia de limos inorgánicos, arenas arcillosas y una pequeña fracción de arena limosa.
- Los sondeos eléctricos verticales (SEV) arrojan resistividades aparentes que corresponden a limos entre los 1.5 -2 m y a mayor profundidad muestra resistividades que corresponden a arenas y gravas.

- La profundidad promedio alcanzada para esta investigación para ensayos sísmicos fue de 16 m, la cual influye la distancia de la línea el espaciamiento entre geófonos y la energía proporcionada por la fuente.
- Con los datos procesados de la técnica MASW 1D y según la norma sismo resistente colombiana NSR-10, los valores de la velocidad de corte  $V_s$  encontrados oscilan entre 180 m/s y 550 m/s, alcanzando una profundidad máxima 40 m, se logró identificar perfiles de suelo tipo C y D, que corresponden a materiales rígidos, arenas con presencia de arcilla.
- Con el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 2D) se hallaron velocidades de corte a 30 m “ $V_s$  30m” las cuales permiten clasificar el tipo de suelo de la zona de estudio de acuerdo a la tabla A.2.4-1 “clasificación de los perfiles de suelo”; de la NSR-10. En dicha zona se encontraron 3 capas con velocidades que oscilan entre los 170 m/s y 430 m/s, con estas velocidades se pudo clasificar el perfil de suelo como tipo D.
- Con la correlación de los métodos geotécnicos y geofísicos se presenta mayor confiabilidad a la hora de realizar la construcción de una obra civil, ya que la geofísica es una base fundamental al caracterizar el tipo de suelo usando ondas superficiales, lo que permite calcular los parámetros dinámicos en función de las ondas P y S.



### Lista de referencias

- Aceves, A. A. (2003). Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. Sanandía, 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.
- 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 [en línea]. 4(9). 2000. Disponible en: <https://www.astm.org/Standards/D5777.htm>
- 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/>
- 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.
- 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.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Título H — Estudios Geotécnicos. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, D. C., 2010, 66 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
- R. E. López Menardi. (2003). Determinación in situ de propiedades ingenieriles de los suelos y su relación con el ensayo normal de penetración.

- 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.
- SeisImager/SWTM Manual, Windows Software for Analysis of Surface Waves, Including explanation of surface wave data acquisition using Geometrics Seismodule Controller Software for ES-3000, SmartSeis ST, Geode, and StrataVisor NZ seismographs [en línea]. 2009, V 3.0, 314 P. Disponible en: <https://geometrics.com/wp>