



**INTEGRACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS, SPT Y
ANÁLISIS DE LABORATORIO PARA LA
CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN EL
PARQUEADERO DEL PATÍNODROMO MUNICIPAL
DEL MUNICIPIO DE PAMPLONA.**

Faryth Stevan Álvarez Ruiz

Universidad De Pamplona
Facultad de ingenierías y arquitectura, ingeniería civil
Pamplona, Colombia
2019



INTEGRACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS, SPT Y ANÁLISIS DE
LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN EL
PARQUEADERO DEL PATÍNODROMO MUNICIPAL DEL MUNICIPIO DE
PAMPLONA.

Faryth Stevan Álvarez Ruiz

Trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Director:

Jairo Alberto Torres

Físico.
Magister en Geofísica

Línea de Investigación:

Línea de Investigación en Geología Básico y Aplica.

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en geofísica y geología- PANGEA
Grupo de investigación en ingeniería civil- ETENOHA

Universidad De Pamplona
Facultad de ingenierías y arquitectura, ingeniería civil
Pamplona, Colombia
2019



Resumen

Este trabajo presenta una aplicación de algunas técnicas geofísicas, ensayos de penetración estándar y análisis de laboratorio en el parqueadero del patínodromo municipal de la ciudad de Pamplona, Norte de Santander. Las técnicas utilizadas fueron, tomografía de refracción sísmica (TRS), análisis multicanal de onda superficial (MAS-W), Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), ensayos de penetración estándar (SPT), análisis granulométrico y límites de Atterberg, con el objetivo de obtener un modelo en tres dimensiones, llevado a cabo mediante la realización de cuatro fases, las cuales son: levantamiento topográfico, toma de datos en campo de los ensayos a realizar, procesamiento de datos con los respectivos softwares, interpretación de los resultados obtenidos, y la generación del modelo en tres dimensiones. Obteniendo como resultado un intercepto en tres dimensiones, con las características de las técnicas geofísicas usadas, pudiendo concluir que los resultados de esta exploración fueron de 18 m de profundidad, presentando un suelo de baja capacidad portante y una clasificación areno arcillosa.

Palabras clave: Geofísica, ondas S, ondas P, geotecnia, geología.



Abstract

This work presents an application of some geophysical techniques, standard penetration tests and laboratory analysis in the municipal skateboard parking lot of the city of Pamplona, Norte de Santander. The techniques used were, seismic refraction tomography (TRS), multichannel surface wave analysis (MAS-W), Vertical Electrical Probes (SEV), in standard penetration sayings (SPT), granulometric analysis and Atterberg limits, with the objective to obtain a three-dimensional model, carried out by means of four phases, which are: topographic survey, data collection in the field of the tests to be carried out, data processing with the respective software, interpretation of the results obtained, and the generation of the model in three dimensions. Obtaining as a result an intercept in three dimensions, with the characteristics of the geophysical techniques used, being able to conclude that the results of this exploration were 18 m deep, presenting a soil with low bearing capacity and a sandy clay classification.

Keywords: Geophysics, S waves, P waves, geotechnics, geology.

Tabla de Contenido

Introducción	1
1. Antecedentes.....	2
2. Localización geográfica.....	2
3. Marco Teórico.....	4
3.1. Técnica Geofísicas	4
3.2. Técnica Geoeléctrico.	7
3.3. Ensayo de penetración estándar (SPT) y análisis de laboratorio.....	8
3.3.2. Análisis de laboratorio.....	10
4. Objetivos.....	13
4.1. Objetivo general.....	13
4.2. Objetivos específicos.....	13
5. Marco geológico.....	13
6. Metodología.....	15
6.1. Levantamiento topografía.....	15
6.2. Adquisición.....	15
6.2.1. Tomografía de refracción sísmica (TRS).....	15
6.2.2. Análisis multicanal de onda superficial (Masw).....	16
6.2.3. Sondeos eléctricos verticales (SEV):.....	18
6.2.4. Ensayo de penetración estándar (SPT) y análisis de laboratorio.....	19
6.3. Procesamiento.....	20
6.3.1. Tomografía de Refracción Sísmica (TRS):.....	20
6.3.2. Análisis multicanal de onda superficial (Masw).....	21
6.3.2.1. MASW-1D.....	21
6.3.3. Sondeos Eléctricos Verticales (SEV):.....	23
6.3.4. Ensayo de penetración estándar (SPT).....	24
6.4. Resultados.....	25
6.4.1. Tomografía de Refracción Sísmica.....	25
6.4.2. MASW-1D.....	26
6.4.3. MAW-2D.....	27
6.4.4. Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).....	29
6.4.5. Ensayo de penetración estándar (SPT).....	30
6.5. Análisis.....	32
6.5.1. Geofísicos.....	32
7. Intercepto en tres dimensiones.....	36
7.1. Intercepto de TRS.....	36
7.2. Intercepto de MASW-2D.....	37
8. Conclusiones.....	38
9. Referencias.....	39



Lista de Figuras.

Figura 1:Localización de la zona de estudio.....	3
Figura 2: Ley de Snell.....	4
Figura 3: Efectos mecánicos de las ondas sísmicas. Ondas de cuerpo (a) ondas P y (b) ondas S. Ondas superficiales: (c) ondas Rayleigh y (d) ondas Love.....	5
Figura 4: Esbozo general del ensayo SPT.....	9
Figura 5:Cuchara partida utilizada en el ensayo de SPT.	9
Figura 6: Curva granulométrica.	11
Figura 7: Cazuela de Casagrande.....	12
Figura 8:Rollos para limite plástico.....	12
Figura 9: Mapa geológico de la zona urbana.	14
Figura 10: Ubicación de las líneas de estudio.....	15
Figura 11: Disposición de TRS.....	16
Figura 12: Equipo de refracción sísmica.	16
Figura 13: Distribución de MASW-1D.....	17
Figura 14: Equipo de MAW	17
Figura 15: Distribución de MAW-2D.....	18
Figura 16: Arreglo de electrodos para SEV.....	18
Figura 17: Ensamblaje del equipo de SPT.....	19
Figura 18: Caña partida ensayo SPT.....	19
Figura 19: Procesamiento de tomografía de refracción sísmica; a) Picado de los primeros arribos; b) Asignación de capas; c) Modelo inicial; d) Modelo final.	20
Figura 20: Procesamiento de MASW-1D; a) Frente de onda; b) Curva de dispersión; c) Modelo inicial; d) Modelo final.	21
Figura 21: Procesamiento de MASW-2D; a) Tren de ondas; b) Curvas de dispersión; c) perfil de velocidades; d) Modelo final.	22
Figura 22: Resultados obtener por IPI2win.; a) Grafica de resistividad aparente vs espaciamento; b) Grafica de resistividad vs AB/2; c) Resultados.....	23
Figura 23: Tomografía de la línea 4.....	25
Figura 24: Tomografía de la línea 3.....	25
Figura 25: Tomografía de la línea 2.....	25
Figura 26: Tomografía de la línea 1.....	26
Figura 27: Tomografía de MASW-2D.....	27
Figura 28: Tomografía de MASW-2D.....	27
Figura 29: Tomografía de MASW-2D.....	28
Figura 30: Tomografía de MASW-2D.....	28
Figura 31:Sondeos eléctricos verticales línea 1.	29
Figura 32: Sondeos eléctricos verticales línea 2.	29
Figura 33: Sondeos eléctricos verticales línea 3.	29

Figura 34: Sondeos eléctricos verticales línea 4.	30
Figura 35: Intercepto de las líneas 1 2 y 3; TRS.	36
Figura 36: Intercepto de las líneas 1 2 y 4; TRS.	36
Figura 37: Intercepto de las líneas 1 2 y 4; MASW-2D.	37
Figura 38: Intercepto de las líneas 1 2 y 3; MASW-2D.	37

Lista de Tablas.

Tabla 1 Coordenadas de las líneas de ensayo	2
Tabla 2:Coordenadas de las perforaciones de SPT.....	3
Tabla 3:Coeficientes de corrección SPT.....	10
Tabla 4:Resistividades de los suelos.....	24
Tabla 5:Resultados de MASW-1D.	26
Tabla 6:Corrección del ensayo de SPT perforación 1.	30
Tabla 7:Corrección del ensayo de SPT perforación 2.	31
Tabla 8:Correlaciones de las ondas S y P, con los parámetros geotécnicos.	32
Tabla 9: Correlaciones geotécnicas por métodos geofísicos.	33
Tabla 10: Correlaciones geotécnicas por métodos geofísicos.	33
Tabla 11: Correlaciones geotécnicas por métodos geofísicos.	34
Tabla 12: Correlaciones geotécnicas por métodos geofísicos.	34
Tabla 13: Correlaciones geotécnicas por SPT.	35
Tabla 14: Correlaciones geotécnicas por SPT.	35

Introducción

En el campo de la ingeniería civil es de vital importancia conocer de antemano los parámetros del suelo, con el fin de tener certeza, bajo qué condiciones se encuentra cimentada cualquier edificación. Para obtener estos parámetros del suelo se utilizan ensayos los cuales se denominan como invasivos y no invasivos, los invasivos tiene dos características, cuando la muestra es alterada y cuando es inalterada, siendo este último (métodos invasivos), los más utilizados en la ingeniería civil, con mayor desgaste al realizar dichos ensayos, y los no intrusivos entre los cuales se encuentra los métodos geofísicos como: refracción sísmica (TRS), el análisis multi-canal (MASW), y el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), los cuales nos determinan dichos parámetros del suelo por las propiedades intrínsecas de la materia.

Obteniendo resultados como: la estratificación del suelo, compacidad del suelo de fundación, definición del tipo de cimentación y un pre-dimensionamiento, la profundidad a excavar, definiendo la ubicación de suelos competentes o yacimientos de rocas sanas o alteradas, determinando fallas geológicas, y el nivel freático.

Utilizando los diferentes métodos, se obtiene unos parámetros más detallados del suelo, con los cuales se identifican que uso se le da al suelo, determinado con certeza que el terreno es el adecuado para dicha tarea y sin poner en riesgo las vidas de quienes, se ven beneficiados por el arte de la construcción, el cual está a la vanguardia de las exigencias del medio y de la sociedad.

El método utiliza, los primeros arribos de la onda, a los geófonos, ondas P, pero como también las llegadas de las ondas S, por medio de estos principios físicos, como lo son las ondas rayleigh, la refracción de la onda, el principio de Fermat, y métodos iterativos se pueden la distribución de velocidades de onda P, y de las ondas S, y de tal manera se pueden determinar el coeficiente de Poisson y otros módulos dinámicos del suelo.

El lugar de estudio está ubicado en el municipio de pamplona, a las afueras del casco urbano, llamado patínodromo, el cual es un sitio de frecuentes visitas por los pamploneses y turistas, teniendo como finalidad, ser un sitio de recreación y esparcimiento, contando con una escuela en funcionamiento, una pista de patinaje, con sus respectivos camerinos, y amplias zonas verdes.

1. Antecedentes.

El análisis de los métodos geofísicos es definido como una metodología para la deducción de las condiciones del suelo a través de la observación de fenómenos físicos relacionados con la estructura geológica, estos ensayos inician con la búsqueda de los yacimientos de petróleo y otros grandes depósitos de minerales.

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), (Juan Avilés, 2016).

En la región se adelantaron estudios con fines de identificar la posible presencia de lixiviados en el relleno sanitario la cortada del municipio de Pamplona, Norte de Santander y prever posibles catástrofes ambientales.

2. Localización geográfica.

El municipio de Pamplona está situado en las coordenadas 72° 39' de longitud oeste y a 7° y 23' de latitud norte. Se encuentra situada a 2.300 metros sobre el nivel del mar. (CORPONOR, 2002)

Los límites del municipio son: al Norte con Pamplonita y Cucutilla, al sur con los municipios de Cacota y Mutiscua, al oriente con Labateca, y al occidente con Cucutilla. Extensión total: 318 Km² Extensión área urbana: 59.214 Km², con 76.983 habitantes aproximadamente. Extensión área rural: 1.176 Km², Temperatura media: 16°. (CORPONOR, 2002). Las líneas se encuentran ubicadas geográficamente ver figura. 1. Con coordenadas en las tablas 1 y 2.

Tabla 1 Coordenadas de las líneas de ensayo

línea	inicio		final	
	latitud	longitud	latitud	longitud
1	7° 21' 42.95" N	72° 39' 28.43" O	7° 21' 43.31" N	72° 39' 30.31" O
2	7° 21' 42.73" N	72° 39' 28.58" O	7° 21' 43.56" N	72° 39' 30.71" O
3	7° 21' 43.34" N	72° 39' 29.02" O	7° 21' 43.06" N	72° 39' 30.42" O
4	7° 21' 42.30" N	72° 39' 28.84" O	7° 21' 43.41" N	72° 39' 30.61" O

Fuente: Autor.

Tabla 2:Coordenadas de las perforaciones de SPT.

SPT	
perforación 1	
latitud	longitud
7° 21' 43.06" N	72° 39' 30.07" O
perforación 2	
latitud	longitud
7° 21' 43.00" N	72° 39' 29.39" O

Fuente: Autor.

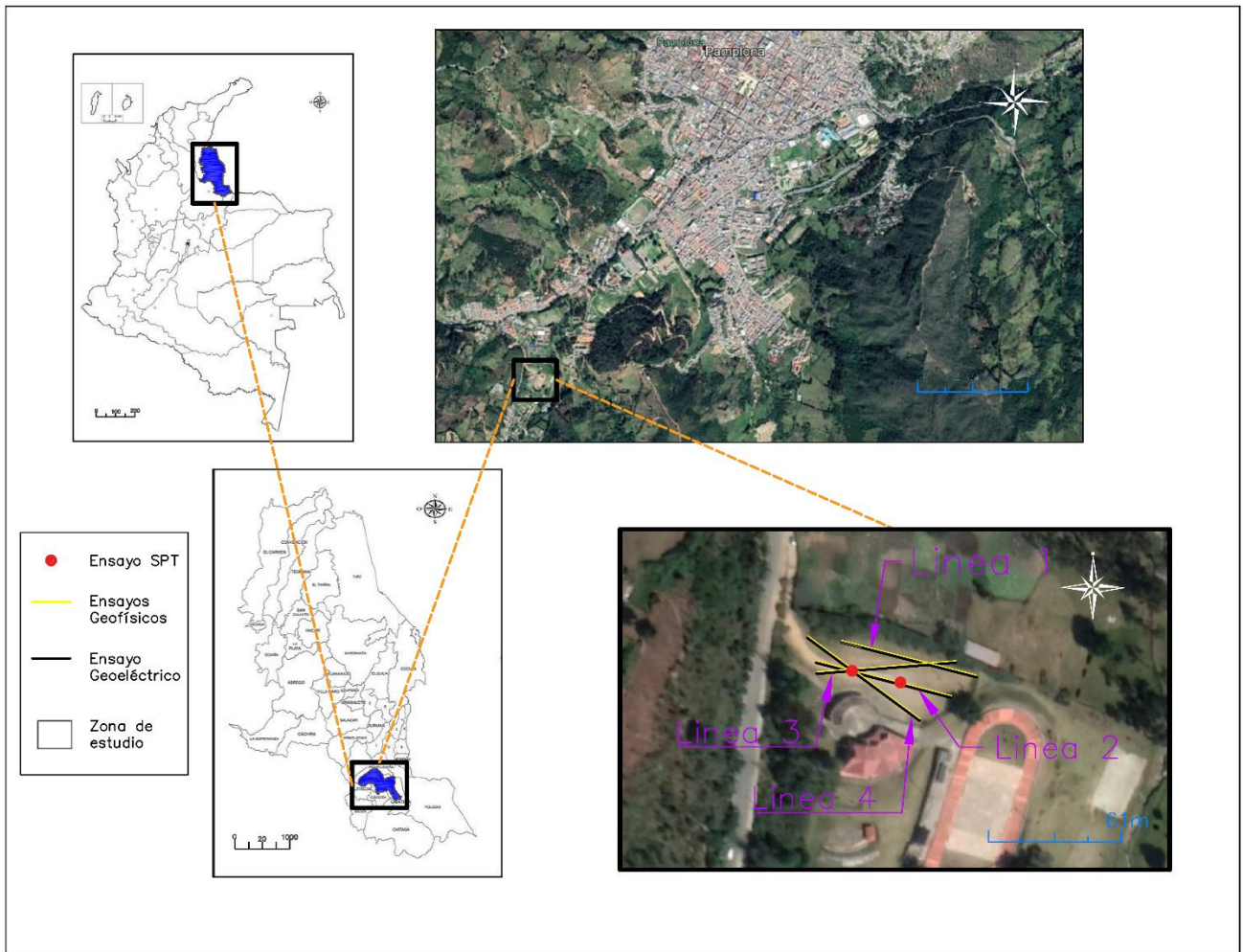


Figura 1:Localización de la zona de estudio.
Fuente: Imagen de google earth y modificada.

3. Marco Teórico.

3.1. Técnica Geofísicas

La técnica geofísica 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, permitiendo identificar la presencia de estratos de alta velocidad, la profundidad a la que se encuentran estos estratos, y el gradiente de velocidades. (Aceves, 2003)

La propagación de las ondas elásticas se genera por impactos que son propinados al suelo con un martillo o porra y en exploraciones de grandes profundidades se utiliza dinamita. Los movimientos ondulatorios generados por las excitaciones artificiales están regidos por dos principios fundamentales:

- Principio de Huygens: establece que todo frente de onda se comporta como un nuevo centro generador de ondas.
- Principio de Fermat: indica que el movimiento ondulatorio entre dos puntos sigue la trayectoria de tiempo mínimo.
- Ley de Snell: que el seno del ángulo incidente es al seno del ángulo de refracción como la velocidad de la onda incidente es a la velocidad de la correspondiente onda refractada. Ver ecuación 1.

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2) \cdot \quad \text{Ecuación 1.}$$

ley de snell

$\theta_1 = \text{angulo incidente.}$

$\theta_2 = \text{angulo de refraccion.}$

$n_1 = \text{indice de refraccion del medio 1.}$

$n_2 = \text{indice de refraccion del medio 2.}$

Ver figura 2.

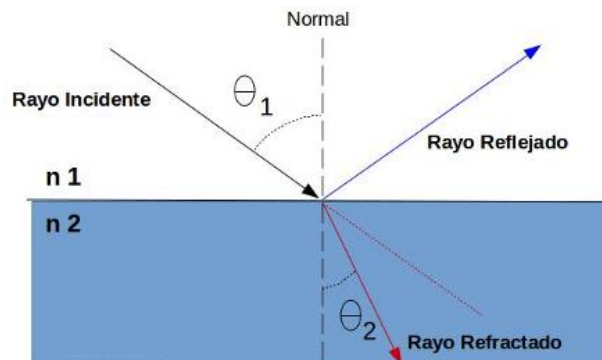


Figura 2: Ley de Snell

Fuente: Autor.

El frente de onda es el lugar geométrico en donde todos los puntos tienen el mismo estado de vibración, o igual tiempo de viaje; mientras que la trayectoria indica la dirección y sentido de la propagación del movimiento ondulatorio; la trayectoria siempre será perpendicular al frente de onda. Para cualquier tipo de medio, la trayectoria seguirá el camino de mas alta velocidad, dependiendo de la distribución de velocidades. (Aceves, 2003)

Tipo 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. (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.

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. Y se denominan así:

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. 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. 3.

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

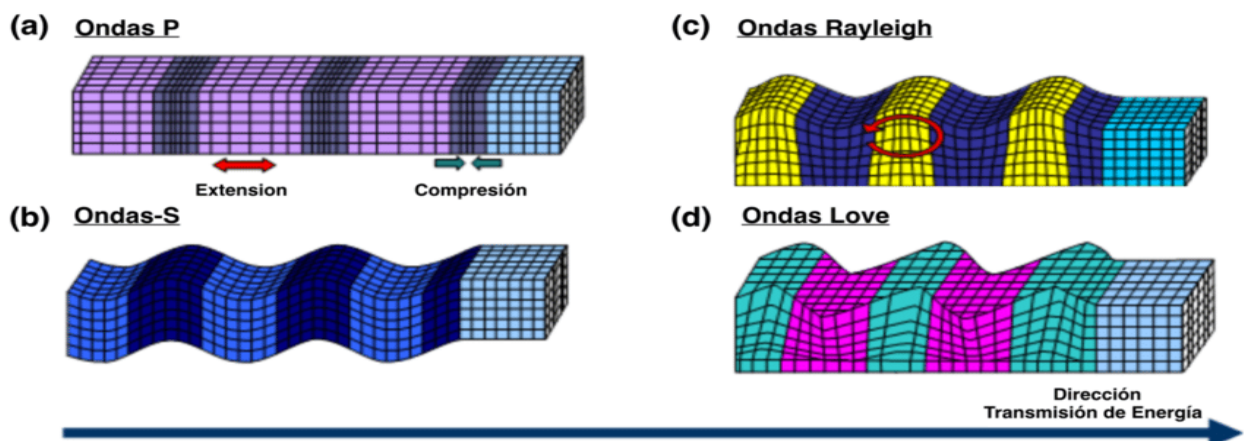


Figura 3: Efectos mecánicos de las ondas sísmicas. Ondas de cuerpo (a) ondas P y (b) ondas S. Ondas superficiales: (c) ondas Rayleigh y (d) ondas Love.

Fuente: Miguel saez.

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:

1. Módulo de Young.
2. Módulo de rigidez.
3. 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).

Coeficiente 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 2:

$$\nu = \frac{(Vp/Vs)^2 - 2}{2(Vp/Vs)^2 - 2} \cdot \quad \text{Ecuación 2.}$$

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 3.

$$G = \rho V_s^2 \cdot \quad \text{Ecuación 3.}$$

G = modulo de rigidez.

ρ = densidad del terreno.

Vs = velocidad de la 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 4.

$$E = 2G(1 + Vs) \cdot \quad \text{Ecuación 4.}$$

E = modulo de rigidez.

G = modulo de young.

Vs = velocidad de la onda s.

3.2. Técnica Geoeléctrico.

Existen diversas técnicas geo-eléctricas o electromagnéticas que miden la resistividad de los materiales, utilizando los sondeos eléctricos verticales, por su sencillez y la relativa economía del equipo necesario.

Por medio del método de resistividad eléctrica se puede determinar la profundidad del nivel freático y del basamento rocoso, y las anomalías y variaciones en el perfil estratigráfico, y en la localización y delimitación de zonas de préstamo en depósitos aluviales. En sondeos profundos es posible distinguir con este método la roca sana de la roca fracturada y algunas características de los fluidos intersticiales. (Aceves, 2003)

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.

siendo el principio físico de la resistividad eléctrica, la base para esta técnica geoeléctrica 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 (ρ). De aquí se tiene que la resistencia a través de un volumen unitario está dada por la ecuación 5: (Arias, 2011).

$$R = \rho / L \cdot \quad \text{Ecuación 5.}$$

R = resistencia electrica.

ρ = resistividad verdadera.

L = longitud.

De acuerdo con la ley de Ohm, la resistencia también se define en términos del cociente de la caída de potencial y la corriente que pasa por el cubo, ver ecuación 6.

$$R = V/I \cdot \quad \text{Ecuación 6.}$$

R = resistencia electrica.

V = potencial electrico.

I = corriente electrica.

Estas ecuaciones se combinan para tener una expresión para la resistividad, que resulta en la ecuación 7.

$$\rho = V * L/I \cdot \quad \text{Ecuación 7.}$$

ρ = resistividad electrica.

V = potencial electrico.

L = longitud.

I = corriente electrica.

cuyas unidades son ohm-metro (Ω -m). El inverso de resistividad ($1/\rho$) es la conductividad (σ) la cual tiene como unidades siemens/metro (S/m) que son equivalentes a ohm/metro.

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)

Durante mucho tiempo, en las técnicas geoelectrica en corriente directa, la profundidad de investigación ha sido considerada sinónimo de la profundidad de penetración de la corriente. Sin embargo, el efecto de una capa en los potenciales o campos observados en superficie no depende únicamente de la densidad de corriente que la atraviesa. (Roy A. & Apparao, 1971), definen la profundidad de investigación característica como, la importancia a la que una capa delgada, medida de la resistividad eléctrica del subsuelo (paralela a la superficie) contribuye con participación máxima a la señal total medida en la superficie del terreno.

3.3. Ensayo de penetración estándar (SPT) y análisis de laboratorio.

3.3.1. Ensayo de penetración estándar (SPT).

Este método describe el procedimiento para penetrar un muestreado de tubo partido con el fin de obtener una muestra representativa del suelo y una medida de la resistencia de dicho suelo, a la

penetración del muestreado, conocido como Ensayo de Penetración Normal (Standard Penetration Test - SPT), como se ve en la Figura.4.

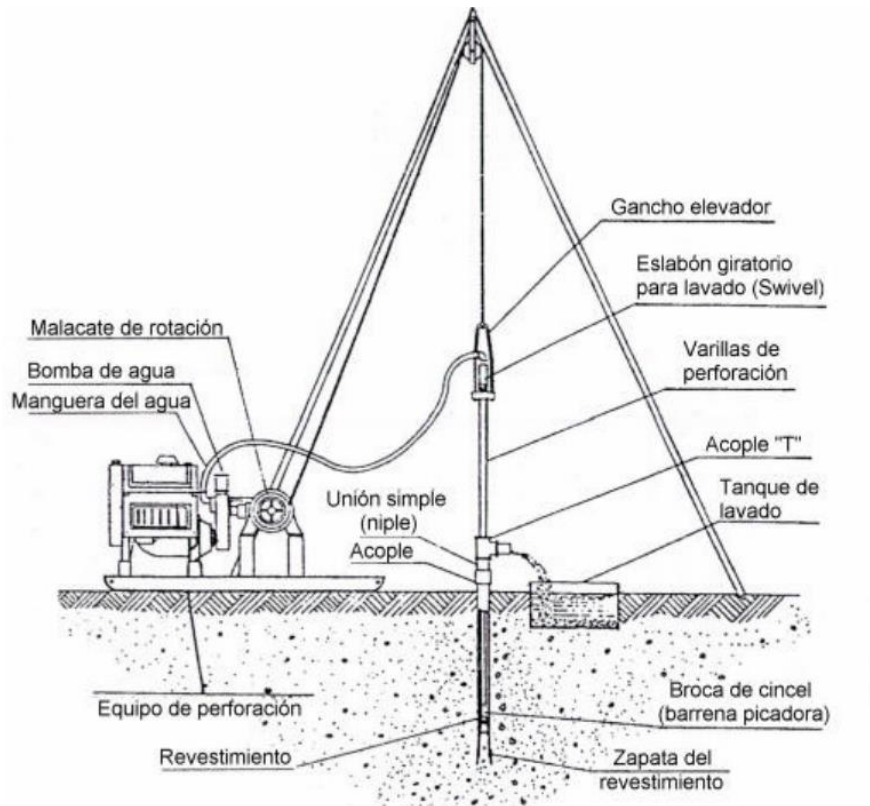


Figura 4: Esbozo general del ensayo SPT.
Fuente: Invias E-111-07.

Consta de hincar un tubo partido, de dimensiones: 66 cm de largo, diámetro inicial 3.5 cm y diámetro medio de 3.81 cm. Siendo golpeado por un peso de 140 lb (63.503 kg), desde una distancia de 30" (0.762 m), hasta que el tubo cortado este totalmente hincado, ver figura 5. Contando los golpes, cada 6" (0.152 m), al introducirse en el terreno, para hacer las respectivas correlaciones de los parámetros geotécnicos. (Invias E-111-07, 2013).

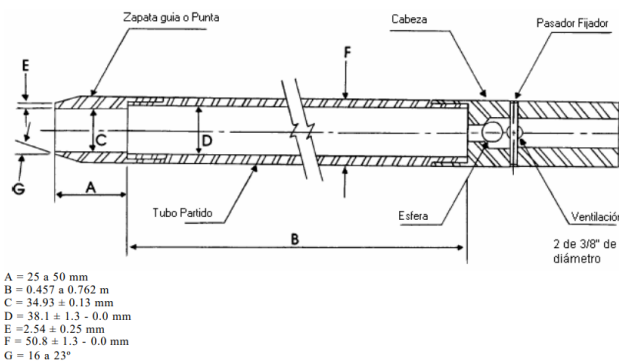


Figura 5: Cuchara partida utilizada en el ensayo de SPT.
Fuente: Invias E-111-07.

proporcionando una muestra de suelo para ensayos de laboratorio a partir del muestreador, el cual produce gran alteración en la muestra, debido a deformación por corte.

utilizado ampliamente en proyectos de exploración geotécnica, por lo tanto, existen correlaciones locales de la cuenta de golpes N, correlacionando con parámetros elásticos y de esfuerzo del suelo, utilizando la siguiente ecuación. con la que se correlaciona los diferentes parámetros geotécnicos.

$$N_{60} = N * \frac{ER}{60\% * 475} * C_{ER} * C_B * C_S * C_R \cdot \quad \text{Ecuación 8.}$$

N_{60} = numero de golpes corregidos al 60%.

ER = energia de impacto.

C_{ER} = correccion por martillo.

C_B = correccion diametro.

C_S = correccion por muestreo.

C_R = correccion 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	Muestreado estándar	C_S	1
	Muestreado sin forro		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: based on skempton.

3.3.2. Análisis de laboratorio.

Con la muestra obtenida del ensayo de penetración estándar o normal, se realizando los ensayos de granulometría límites de Atterberg, con el fin de clasificar el suelo y tener más características de suelo.

Granulometría

Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de lo. tamaño 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 malla de laboratorio de abertura redonda. y no se empleará para agregados recuperados de mezclas asfálticas. (Invias E-213-07,2013)

Obteniendo como resultado una distribución semi-logarítmica. como se observa en la figura 6, con la que puede determinar si el material este bien gradado y se le determina los coeficientes granulométricos con el fin de obtener más características del suelo.

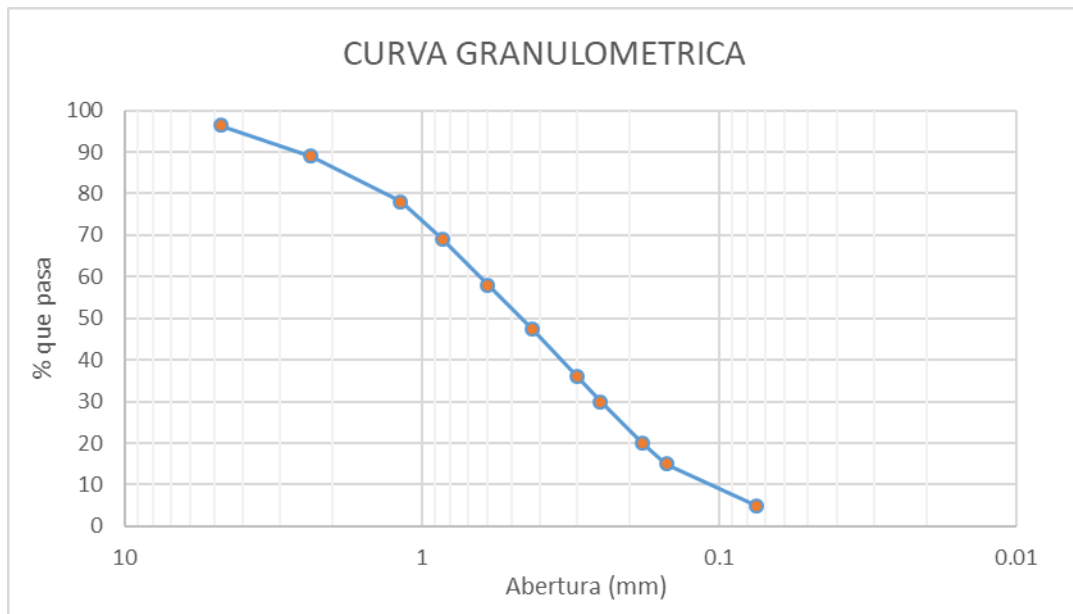


Figura 6: Curva granulométrica.

Fuente: Autor.

Los resultados se emplean para determinar el cumplimiento de las especificaciones que son aplicable, a suministrar datos necesarios para la producción de diferentes agregados y mezclas que contengan agregados y para clasificar el suelo. Los datos pueden también servir para el desarrollo de las relaciones referentes a la porosidad y el empaquetamiento.

Límites de Atterberg

Limite liquido

El límite liquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo seco al horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. (Invias E-125-07, 2013)

El ensayo consiste en el método de Casagrande, en el cual se utiliza una cazuela con las especificaciones mostradas en la figura 7, depositando una muestra de suelo hasta quedar bien

enrazado, luego se le hace una ranura con una espátula especial ,la cual tiene una punta, para hacer la ranura, se prosigue a darle golpes por medio de un sistema, el cual lo deja caer de la misma altura, contado los golpes hasta que se cierre la ranura, para tomar una muestra y determinar la humedad de la muestra a determinado número de golpes, la humedad tomada en consideración es la que se presenta a los 25 golpes este se define como el limite líquido.

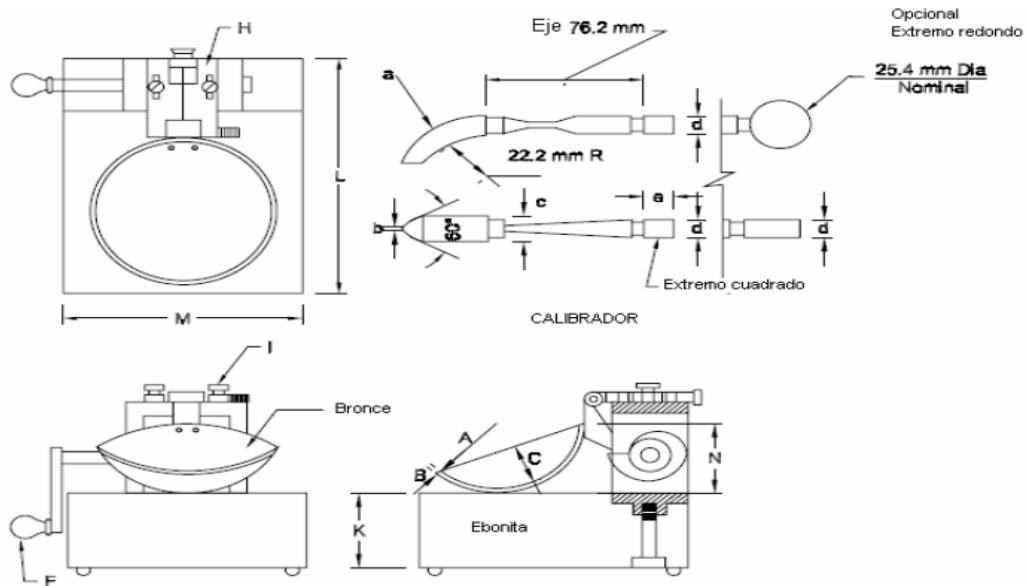


Figura 7: Cazuela de Casagrande.
Fuente: Invias E-125.

Limite Plástico e Índice de Plasticidad.

El limite plástico de un suelo es el contenido más bajo de humedad, determinando por este procedimiento, en el cual el suelo permanece en estado plástico. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo del contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca del suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico. Este índice corresponde a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.

El método de moldeo manual de rollos de suelo debe ser dado por el procedimiento normativo indicado en la norma Invias especificación 126 de 2013, Se denomina límite plástico a la humedad más baja con la cual pueden formarse rollos de suelo de unos 3mm (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa, sin que dichos rollos se desmoronen, ver figura 8. (Invias E-126-07, 2013).



Figura 8: Rollos para limite plástico.
Fuente: Autor.

4. Objetivos.

4.1. Objetivo general.

Integrar los métodos geofísicos y geotécnicos en el patínodromo municipal de Pamplona, Norte de Santander.

4.2. Objetivos específicos.

- Realizar levantamiento topográfico de la zona de estudio.
- Obtener los resultados de los ensayos geofísicos y geotécnicos.
- Procesar perfiles y modelos geofísicos y geoeléctrica.
- Calcular los parámetros geotécnicos y clasificación del suelo.
- Proponer modelo de intercepto en tres dimensiones (3D), a partir de los ensayos geofísicos.

5. Marco geológico.

El municipio de Pamplona se encuentra ubicado, en el flanco norte del macizo de Santander, sobre la cordillera oriental y dentro del sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta a escala regional (Villamil, 2017). Su casco urbano se desarrolla sobre, depósitos cuaternarios de origen fluvio-lacustre depositados discordantemente, sobre rocas ígneas, pertenecientes a la unidad de Ortoneis(pDo), en el denominado valle del espíritu santo, cortado por el cauce del río pamplonita y bordeado por rocas sedimentarias pertenecientes a las formaciones Girón, Tibú-Mercedes (kitm) y Aguardiente (Kia). (CORPONOR,2002). Ver figura 9.

La estructura de la geología del municipio de Pamplona, se encuentra ubicado en una zona de tectónica compresiva, enmarcada dentro de la evolución de la cordillera oriental, la que generó procesos magmáticos y tectónicos, que afectaron a las diferentes litologías presentes. Como resultado de estos procesos geológicos, se presentan estructuras a nivel regional, como el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta, de extensión regional, la que domina, el patrón estructural, del franco oriental del Macizo de Santander, representado en la zona por fallas y estructuras con dirección norte-sur, siguiendo el tren estructural. (Villamil, 2017).

El casco urbano del Pamplona se encuentra enmarcado por falla de Pamplona de tipo inverso con rumbo norte-sur, y el sistema de fallas de Chitagá, de tipo inverso con rumbo norte-sur, cortado por fallas de tipo normal, en el cerro Cristo Rey y en la cuenca de la quebrada “El Escoria”. (CORPONOR, 2002)

La composición estratigráfica del municipio de Pamplona, afloran rocas metamórficas del proterozoico tardío al paleozoico, rocas ígneas intrusivas y rocas sedimentarias que varían en edad desde el paleozoico tardío al Terciario pertenecientes a la Cuenca de Maracaibo. (Villamil, 2017)

Los depósitos cuaternarios se encuentran distribuidos, en el valle del espíritu santo, interceptados por el cauce del río pamplonita, reposando de forma aleatoria, sobre las diferentes formaciones

presentes, sobre la unidad Ortoneis (pDo). Originando depósitos clasificados en: depósito fluvio-lacustres, depósitos aluviales. Encantándose ampliamente distribuidos en la zona, cubriendo estas litologías, en su mayoría siendo de origen denudacional, estructural como coluviones, conos de eyección; y de origen fluvial como aluviones. (CORPONOR, 2002)

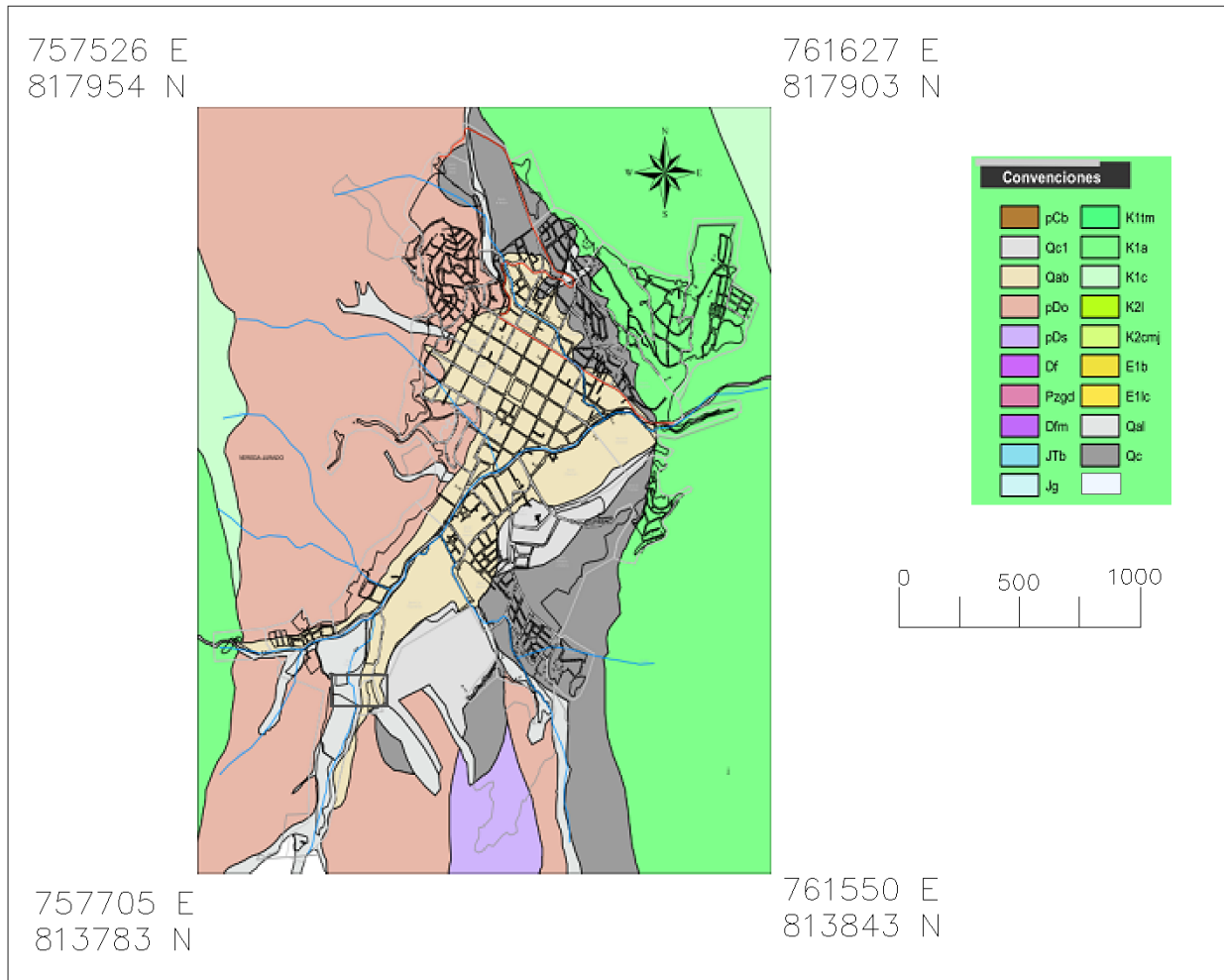


Figura 9: Mapa geológico de la zona urbana.

Fuente: William Villamil “Pamplona, Norte de Santander, geología y morfología”.

Las formas del relieve en el municipio de Pamplona tienen su origen en el levantamiento de la cordillera oriental, durante el Neógeno y movimientos diferenciados del Macizo Ígneo, Metamórfico de Santander, que dio como resultado plegamientos, fallas y procesos denudacionales que dieron origen a una gran cantidad de sedimentos que fueron depositados discordantemente sobre las litologías presentes. (Villamil, 2017).

Partiendo de la información geológica se identifican, zonas con mayor vulnerabilidad de una amenaza natural o provocada, y determinar el uso adecuado del suelo, sin que se vea afectada la naturaleza y el desarrollo urbano.

6. Metodología.

La metodología utilizada consta de cuatro fases que son el levantamiento topográfico de la zona de estudio, la adquisición de información de campo por cada una de las técnicas utilizadas {TRS, MASW, SPT), procesamiento de los datos obtenidos y la integración de datos e interpretación, con la finalidad de proponer un modelo de intercepto en tres dimensiones.

6.1. Levantamiento topografía.

El levantamiento topográfico se hizo con un sobre vuelo de drone, obteniendo las curvas de nivel, teniendo la disposición de las líneas de estudio como se muestra en la figura 10.



Figura 10: Ubicación de las líneas de estudio.
Fuente: Foto de drone y editada.

Adquiriendo el perfil de las líneas y las condiciones del terreno si es llano, quebrado, y determinar la elevación de geófono a geófono, y obtener un modelo más acertado a las condiciones reales.

6.2. Adquisición.

6.2.1. Tomografía de refracción sísmica (TRS).

Para este ensayo se utiliza un equipo que consta de: sismógrafo, geófonos, sensor inercial, placa metálica, martillo, y cableado. En este método se despliegan 24 geófonos con capacidad de 14 Hz, en cuatro líneas de 46 metros de largo, teniendo una separación entre geófonos de 2 m, con el fin de obtener una resolución de aproximadamente 1. Utilizando como tipo de fuente un martillo de 14 lb, iniciando a golpear a 7 m, por fuera de la línea y cada 12 m, y se toma dos mediciones por cada impacto, ver figura 11, siendo esta denominada la técnica de contra perfil la cual facilita la identificación de la toma de datos. Obtenido un modelo del suelo, a través de una tomografía

según velocidades de propagación de la onda P, presentes en el suelo.

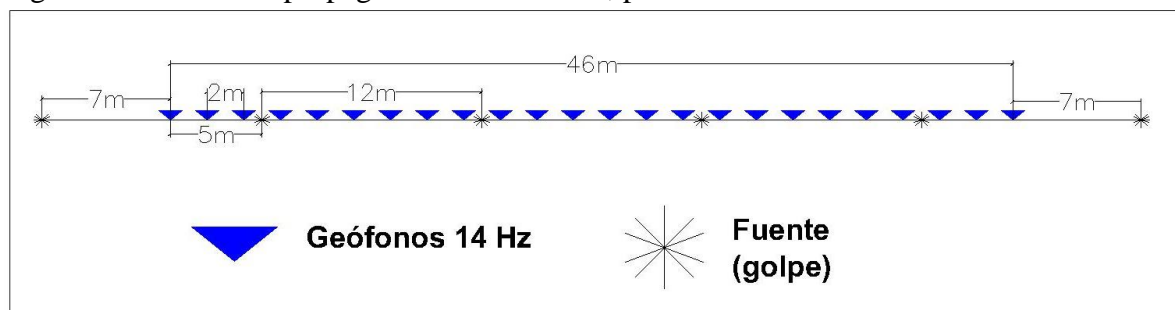


Figura 11: Disposición de TRS.

Fuente: Autor.

Para este ensayo se utilizan las ondas de rayleigh o las ondas primarias (V_p), se capturan los frentes de onda, con los geófonos, siendo interpretada por el sismógrafo, el cual se conecta a los geófonos y al PC, utilizando el software (seismanger), el cual hace la toma de datos, ver Figura 12.

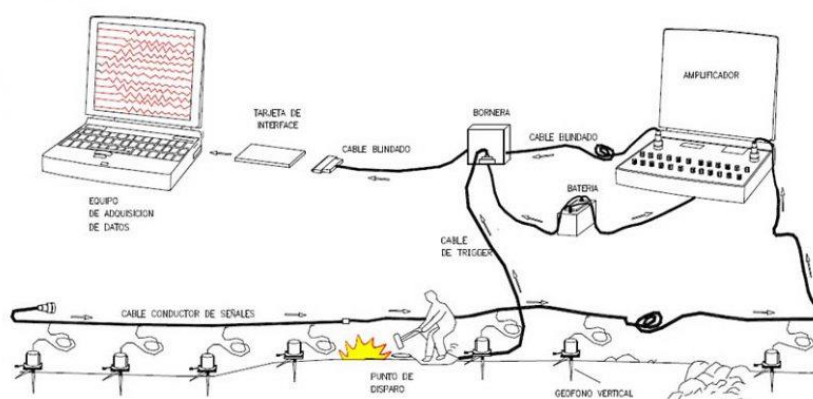


Figura 12: Equipo de refracción sísmica.

Fuente: Geosciencie.

Utilizando otro software (pickwin), el cual representa gráficamente el comportamiento de la onda en el suelo, y se procede a identificar los primeros arribos de la onda, aprovechando para identificar los frentes de velocidades, y su correspondiente asignación de cambio de pendiente o capas. Generando un modelo inicial, partiendo de los frentes de velocidades, estimado por medio de métodos matemáticos. Sometiéndose a una corrección la cual nos permite apreciar la cantidad de error que presente el modelo, con el fin de acercarse lo más posible a la realidad, aceptándose un error del 2%, obteniendo como resultado un perfil del suelo en base a las velocidades de propagación de la onda P, que tiene el suelo.

6.2.2. Análisis multicanal de onda superficial (Masw).

Es un método utilizado para determinar las ondas de corte o las ondas secundarias (V_s), es uno de los ensayos sísmicos de evaluación de la condición elástica del suelo para fines ingenieriles. El

equipo utilizado en este ensayo consta de: sismógrafo, geófonos, sensor inercial, placa metálica, martillo, y cableado. Usan 24 geófonos o receptores, con capacidad de 4,5 Hz, en la línea de 46 metros con una separación de 2 m, con el fin de obtener una resolución aproximada de un metro. Estando conectados a un canal de registro, excitando el suelo con un martillo de 14 lb, iniciando golpes desde el otro extremo de la línea, 9 m por fuera de la línea y acabando justo antes que inicie la línea de geófonos ver figura 13. Analizando la velocidad de propagación de las ondas superficiales, con el fin de determinar la variación de la velocidad de la onda S, en el centro de la línea, teniendo como nombre MASW-1D.



Figura 13: Distribución de MASW-1D.
Fuente: Autor.

Para este análisis de dispersión de la onda S se utiliza un software (seismanager), el cual ayuda a capturar las excitaciones que sufren los geófonos por los golpes, transmitiéndose al sismógrafo y finalmente al PC, obteniendo los primeros arribos del terreno a estudiar ver Figura 14.

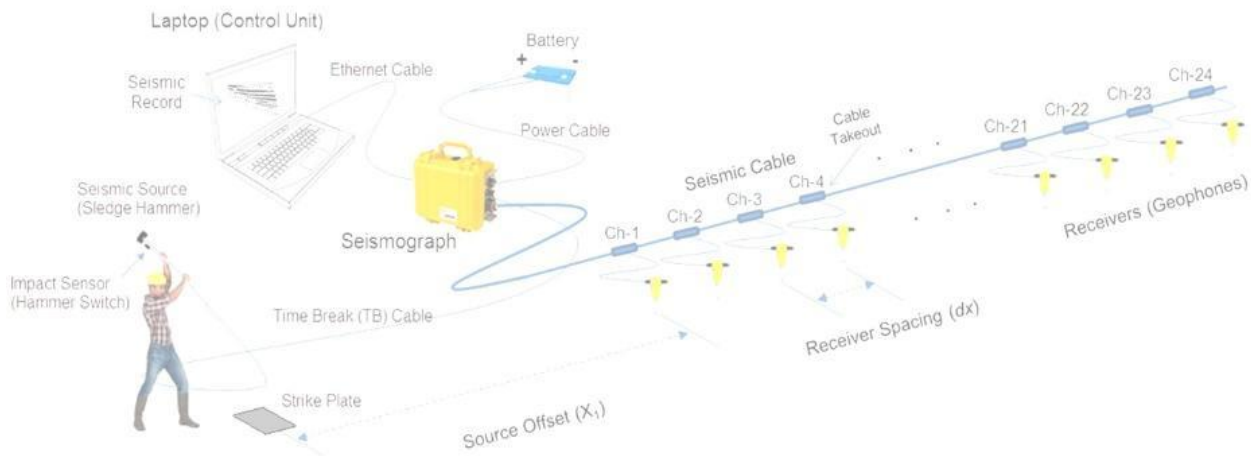


Figura 14: Equipo de MAW
Fuente: MASW Tool Package Lease.

Existe otro análisis de la dispersión de la onda S, llamado MASW-2D, el cual nos presenta un análisis en dos dimensiones (profundidad y largo), contra las velocidades de propagación de la onda S, para este caso se asumen, las mismas condiciones para el método descrito anteriormente, con excepción de los golpes a analizar, estos golpes están dentro de la línea y se encuentran en medio de los geófonos, ver figura 15, a diferencia del otro método MASW-1D, que es por fuera

de la línea, esta técnica lleva como nombre MASW-2D.

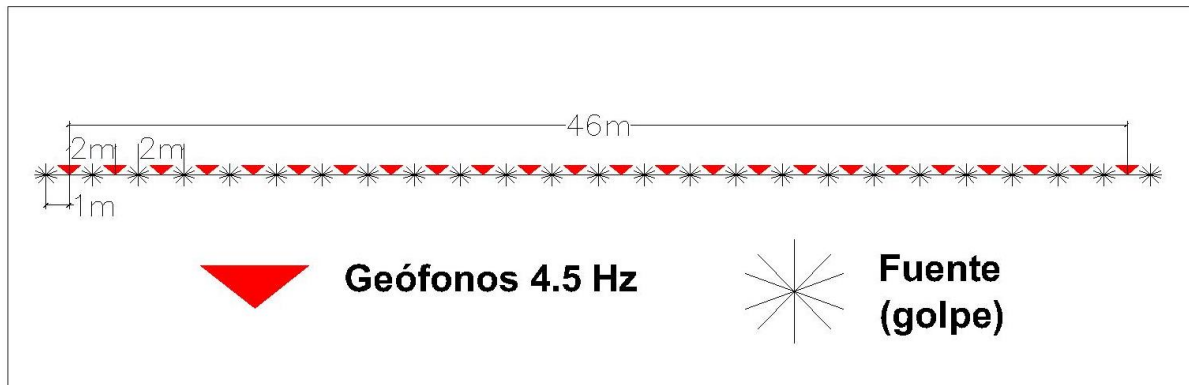


Figura 15: Distribución de MAW-2D.

Fuente: Autor.

6.2.3. Sondeos eléctricos verticales (SEV):

El ensayo consiste en transmitir una descarga eléctrica por medio de una configuración de electrodos, estando dispuestos simétricamente con respecto a su centro, estimulando el suelo mediante la inyección de corriente a través de los electrodos, obteniendo la diferencia de potencial, en los otros nodos, ver figura 16. Los electrodos deben ser hincados en la superficie del terreno, y teniendo en cuenta la configuración o arreglo de los electrodos; tipos de arreglos: arreglo schlumberger, arreglo wenner, arreglo dipolo-dipolo, arreglo polo-dipolo y arreglo polo-polo. El arreglo utilizado fue el de wenner, por su facilidad de ejecución en el terreno y su captura de datos.

Las líneas de ensayos están dispuestas sobre las líneas de los ensayos geofísicos, con la finalidad de integrar los datos obtenidos con las técnicas geofísicas, los equipos utilizados fueron equipo que trasmite corriente y toma lecturas de potencial, barrilas macizas, PC con el software, y el cableado.

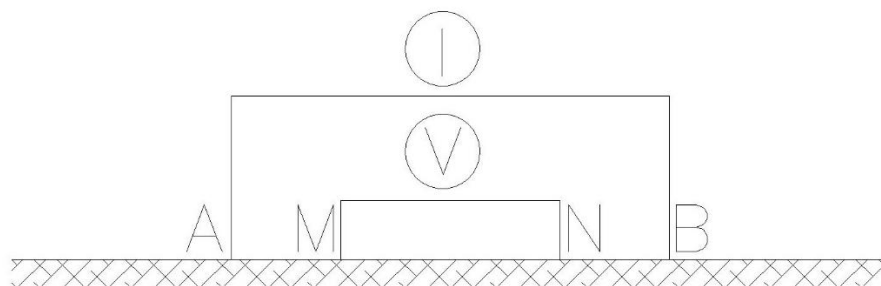


Figura 16: Arreglo de electrodos para SEV.

Fuente: Autor.

6.2.4. Ensayo de penetración estándar (SPT) y análisis de laboratorio.

Este ensayo es bastante utilizado para determinar, los parámetros del suelo, consta de hincar tubo partido, de dimensiones: 66 cm de largo, diámetro inicial 3.5 cm y diámetro medio de 3.81 cm. Siendo golpeado por un peso de 140 lb (63.503 kg), desde una distancia de 30" (0.762 m), hasta que el tubo cortado este totalmente hincado. Contando los golpes, cada 6" (0.152 m), al introducirse en el terreno ver figura 17, para hacer las respectivas correlaciones de los parámetros geotécnicos. (Invias E-110-07).



Figura 17: Ensamblaje del equipo de SPT.
Fuente: Foto in situ.

Luego se extrae la muestra, que se encuentra dentro del tubo partido, se toma muestra de humedad del suelo, se empaca y se lleva al laboratorio para hacer el ensayo de granulometría y límites de Atterberg, ver Figura 18. con el fin de que sea clasificado por el sistema unificado de suelos (uscs). Repitiendo este proceso, hasta que el número de golpes sea 50 o cuando la suma de las dos terceras partes, del cono partido sume 100 golpes. Utilizando las ecuaciones determinadas para el tipo de suelo ya clasificado y determinar los parámetros geotécnicos.



Figura 18: Caña partida ensayo SPT.
Fuente: Foto in situ.

6.3. Procesamiento.

6.3.1. Tomografía de Refracción Sísmica (TRS):

procesamiento se da mediante los softwares ("Plotrefa Refraccion Analysis", y Pickwin), obtenido un modelo del suelo, a través de una tomografía según velocidades de propagación de la onda P, determinando las velocidades de onda P, presentes en el suelo.

Para este ensayo se utilizan las ondas de rayleigh o las ondas primarias (V_p), capturando los frentes de onda, con los geófonos, siendo interpretada por el sismógrafo, el cual se conecta a los geófonos y al PC, utilizando el software (seislrnanger), el cual hace la toma de datos. Utilizando otro software (pickwin), el cual representa gráficamente el comportamiento de la onda en el suelo, y se procede a identificar los primeros arribos de la onda, como se puede apreciar en la figura 19.a. Aprovechando para identificar los frentes de velocidades, y su correspondiente asignación de cambio de pendiente o capas. Ver en la figura.19. b.

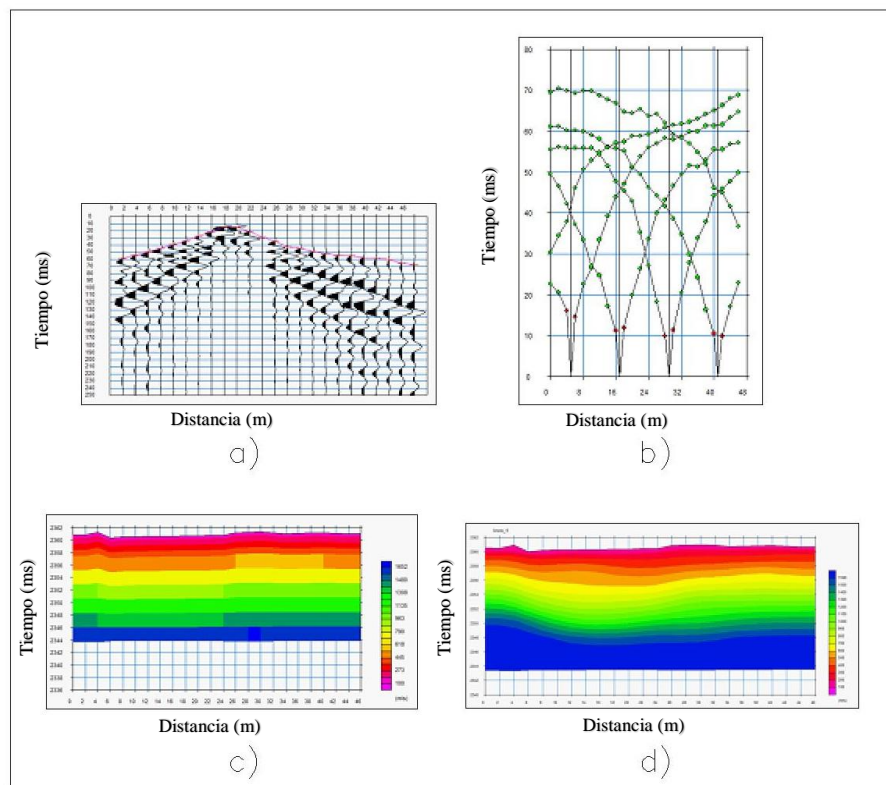


Figura 19: Procesamiento de tomografía de refracción sísmica; a) Picado de los primeros arribos; b) Asignación de capas; c) Modelo inicial; d) Modelo final.
Fuente: Software utilizados y editado.

Generando un modelo inicial, partiendo de los frentes de velocidades estimado por medio de métodos matemáticos, ver figura 19.c. Sometiéndose a una corrección la cual nos permite apreciar la cantidad de error que presente el modelo, con el fin de acercarse lo más posible a la realidad,

aceptándose un error del 2%, obteniendo como resultado un perfil del suelo en base a las velocidades de propagación de la onda P que tiene el suelo. Como se muestra en la figura 19.d.

6.3.2. Análisis multicanal de onda superficial (Masw).

6.3.2.1. MASW-1D.

Al obtener los datos de propagación de las ondas S, con el software (seislmager), se inicia con el procesamiento de la información obtenida, con ayuda de dos softwares (surface wave Analysis wizard y WAVeEq (Surface Wave Analysis)), con los cuales permite hacer una previa inspección, de los datos obtenidos, para filtrar errores obtenidos en campo, y nos permite realizar la curva de dispersión, respectivamente, ver figura 20.a. y 20.b.

Obteniendo un modelo inicial por medio de inversiones matemáticas, ver figura 20.c. Para determinar un modelo final, por medio de un proceso iterativo y determinar cuánto es el porcentaje de error, ver figura 20.d. Acercándose lo más posible a las condiciones del terreno, asumiendo un error de menos de 5%, y 10 iteraciones. El modelo obtenido, presenta un perfil de la velocidad de la onda S, en función de la profundidad.

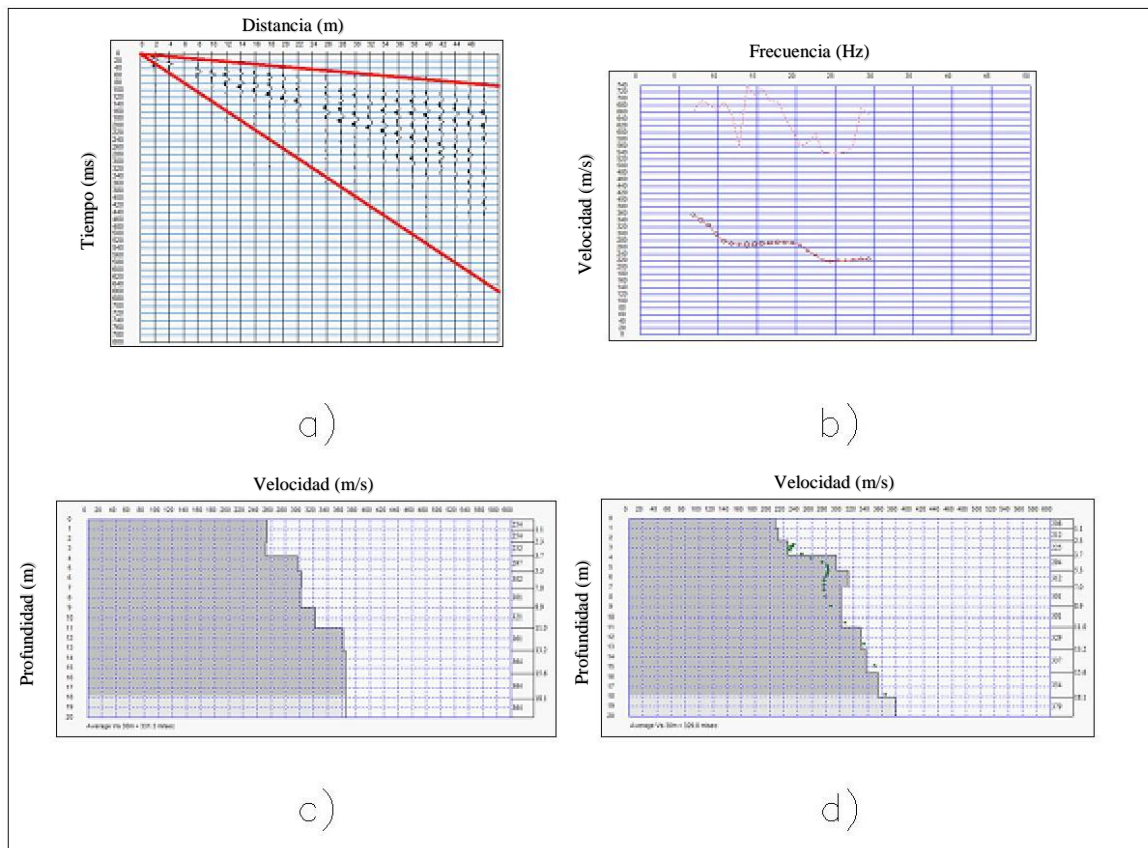


Figura 20: Procesamiento de MASW-1D; a) Frente de onda; b) Curva de dispersión; c) Modelo inicial; d) Modelo final.

Fuente: Imagen de software y modificada.

El procedimiento anteriormente descrito es para obtener un perfil por cada golpe, al final se promedia los perfiles generados. para obtener un perfil del suelo más acertado. Este procedimiento se denomina MASW-1 D. entregando un perfil del suelo, basado en la profundidad vs las velocidades de propagación de la onda S.

6.3.2.2. MASW-2D.

Existe otro análisis de la dispersión de la onda S, llamado MASW-2dD, el cual nos presenta un análisis en dos dimensiones (profundidad y largo), contra las velocidades de propagación de la onda S, para este caso se asumen, las mismas condiciones para el método ya descrito, con excepción de los golpes a analizar, estos golpes están dentro de la línea y se encuentran en medio de los geófonos, a diferencia del otro método (MASW-1D), que es por fuera de la línea.

Para el procesamiento de los datos, se hace en grupo o lista, Con el fin de analizar todos los golpes, generar un modelo más completo, después de cargar los datos, y verificar que estén todos los golpes, utilizando el software (surface wave Analysis wizard"), se verifica la geometría del modelo, ver Fig. 21.a. Y genera las curvas de dispersión, ver figura 21.b.

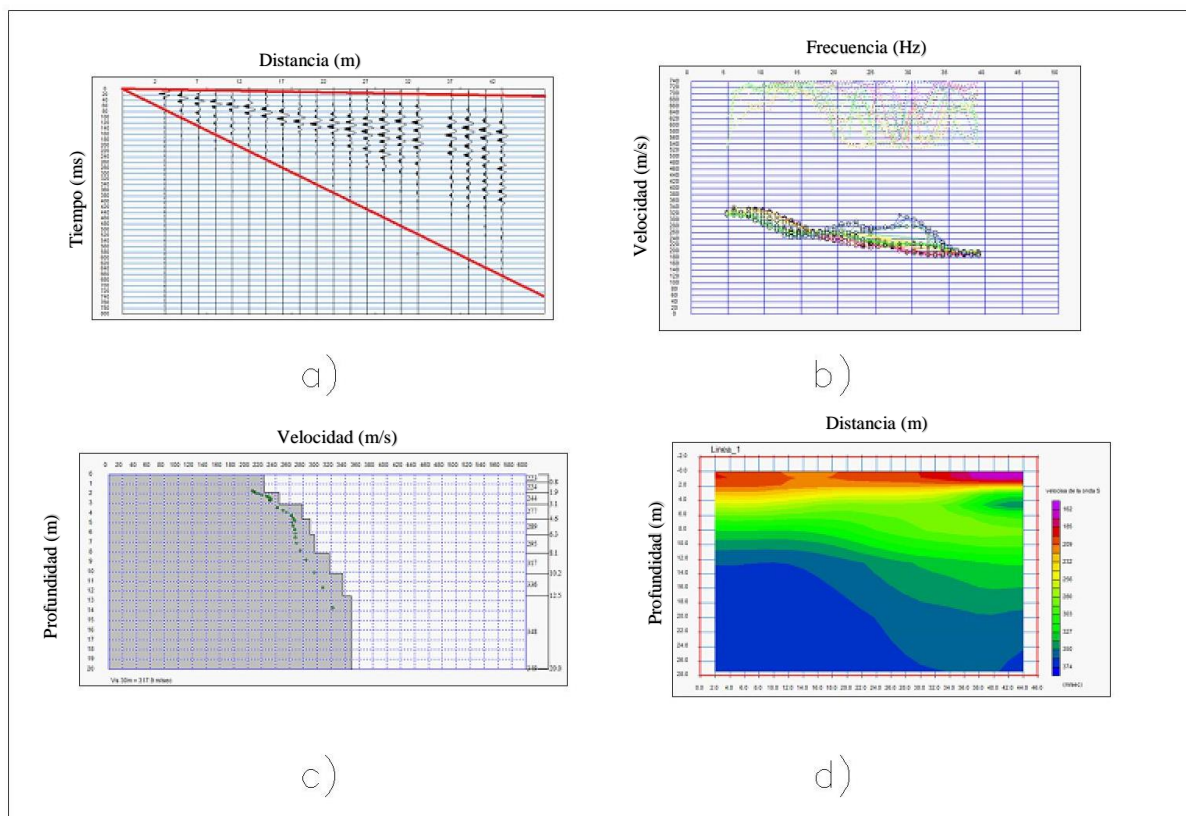


Figura 21: Procesamiento de MASW-2D; a) Tren de ondas; b) Curvas de dispersión; c) perfil de velocidades; d) Modelo final.

Fuente: Imagen de software y editado.

Para obtener un perfil de velocidades, de igual manera como se hizo, en el método de MASW-1D, ver figura 21.c. Se asume un error del 10% y 10 iteraciones, para determinar un modelo más real, y poder caracterizar el suelo con más certeza.

Al hacer dicho procedimiento se usa, los softwares (WaveEq y GeoPlot), con los cuales se procesan los modelos iniciales, y se obtiene una tomografía del suelo respectivamente, en la cual se puede apreciar, la distribución de velocidades, correspondientes a la composición del suelo, ver figura 21.d.

6.3.3. Sondeos Eléctricos Verticales (SEV):

En el procesamiento de datos se utiliza dos softwares (PowerDAQ y IPI2win), con los cuales, se toman los datos en campo de la resistividad, representando como puntos que tiende a una curva, por lo general, ver figura 22.a. Se procesa los resultados respectivamente, cargando los datos de las resistividades eléctricas, para generar una curva en función del espaciamiento entre electrodos y la resistividad, ver figura 22.b.

Para determinar el ancho de los estratos y sus respectivas resistividades, ver figura 22.c. Con el fin de correlacionar las resistividades calculadas y algunas propiedades de los suelos, también se puede identificar el nivel freático con bastante confiabilidad.

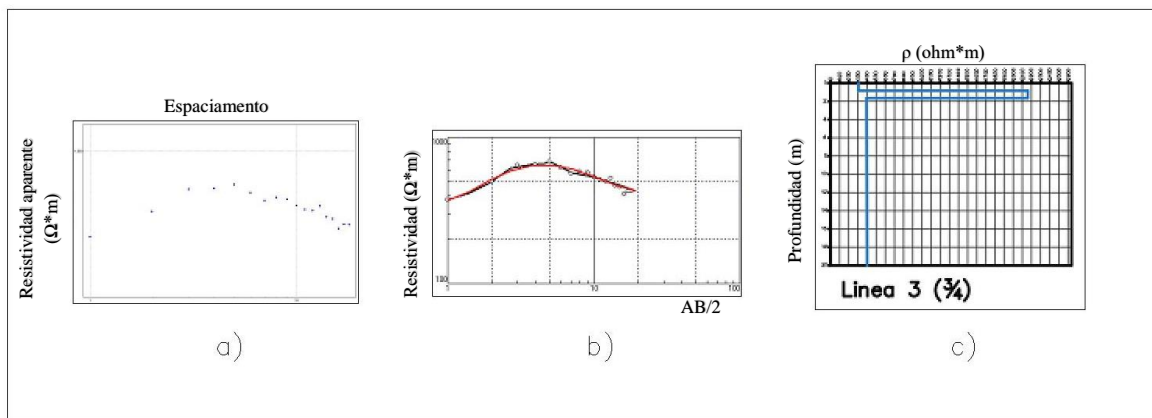


Figura 22: Resultados obtener por IPI2win.; a) Grafica de resistividad aparente vs espaciamiento; b) Grafica de resistividad vs AB/2; c) Resultados.

Fuente: Imagen de IPI2win y editado.

Por ello, a la hora de realizar esta técnica y conseguir los mejores resultados, es indispensable tratar de obtener e interpretar la mayor cantidad de información geológica de un área, lo que permitirá ajustar la curva de resistividades obtenida de la mejor manera respecto a los materiales esperables en el área y establecer la conformación del subsuelo mediante la ubicación espacial de las capas resistivas o perfil de resistividades. A continuación, se presenta en la tabla 4, con las resistividades de los suelos.

Tabla 4: Resistividades de los suelos.

Material	resistividad ($\Omega \cdot m$)
basamento de roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
basamento de roca fracturada.	1500-500
basamento de roca fracturada saturada con agua.	100-2000
basamento de roca fracturada saturada con agua salada.	1-100
gruss no saturado.	500-1000
gruss saturado.	40-50
saprolito no saturado.	200-500
saprolito saturado.	40-100
gravas no saturadas.	500-2000
gravas saturadas.	300-500
arenas no saturadas.	400-700
arenas saturadas.	100-200
limos no saturados.	100-200
limos saturados.	20-100
limos saturado con agua salada.	5-15
arcillas no saturadas.	20-40
arcillas saturadas.	5-20
arcillas saturadas con agua salada.	1-10
andosoles secos.	1000-2500
andosoles no saturados.	300-1000
andosoles saturados.	30-50

Fuentes: Universidad nacional, 2000.

6.3.4. Ensayo de penetración estándar (SPT).

El procesamiento se lleva a cabo en el software (NOVO SPT), en el cual se aplican las respectivas correcciones del número de golpes, la relación de energía, la longitud de la barra, para obtener los diferentes parámetros del suelo tales como:

- Ángulo de fricción.
- Capacidad de carga para zapatas superficiales.
- Densidad.
- Módulo de corte.
- Módulo de Young.
- La velocidad de las ondas S.

utilizando la base de datos de autores del software, para la deducción de estos parámetros, por varios autores. Con el fin de obtener una situación mejor descrita.

6.4. Resultados.

6.4.1. Tomografía de Refracción Sísmica.

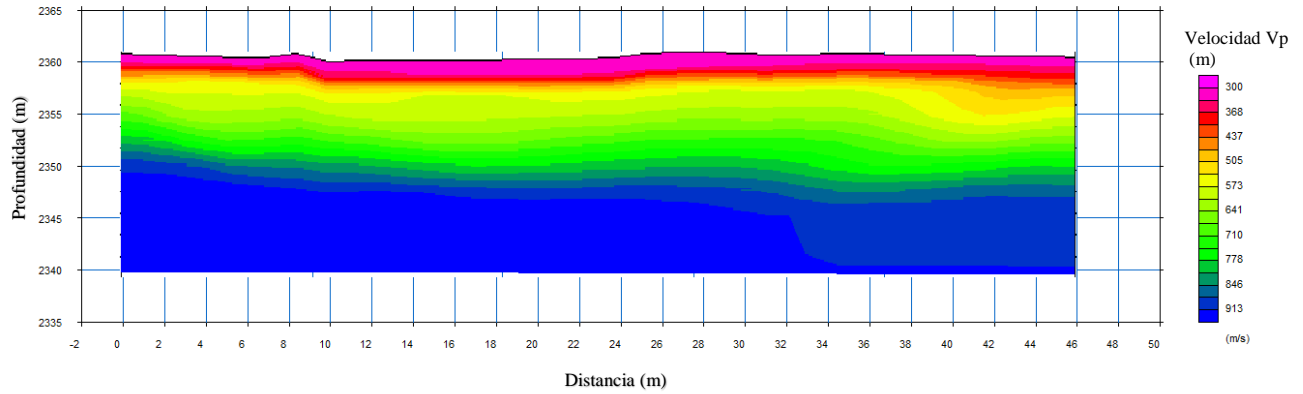


Figura 23: Tomografía de la línea 4.

Fuente: Plotrefa y editado.

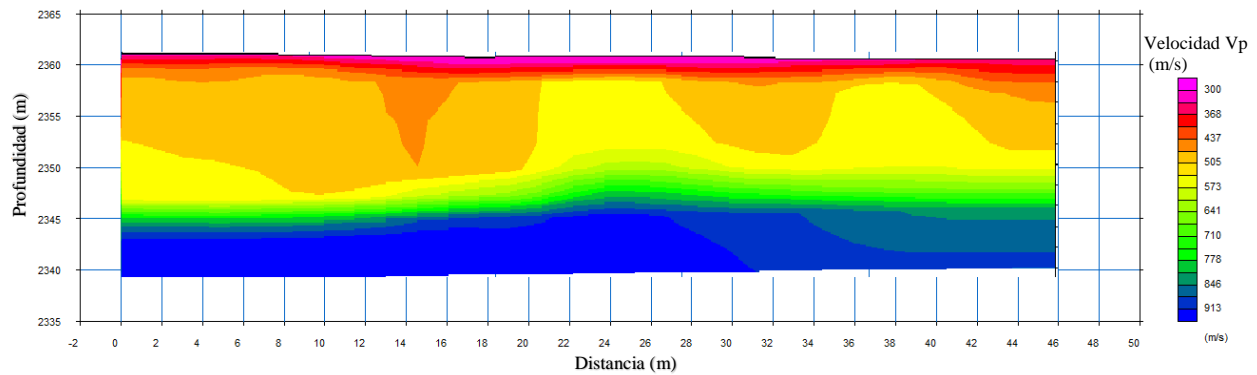


Figura 24: Tomografía de la línea 3.

Fuente: Plotrefa y editado.

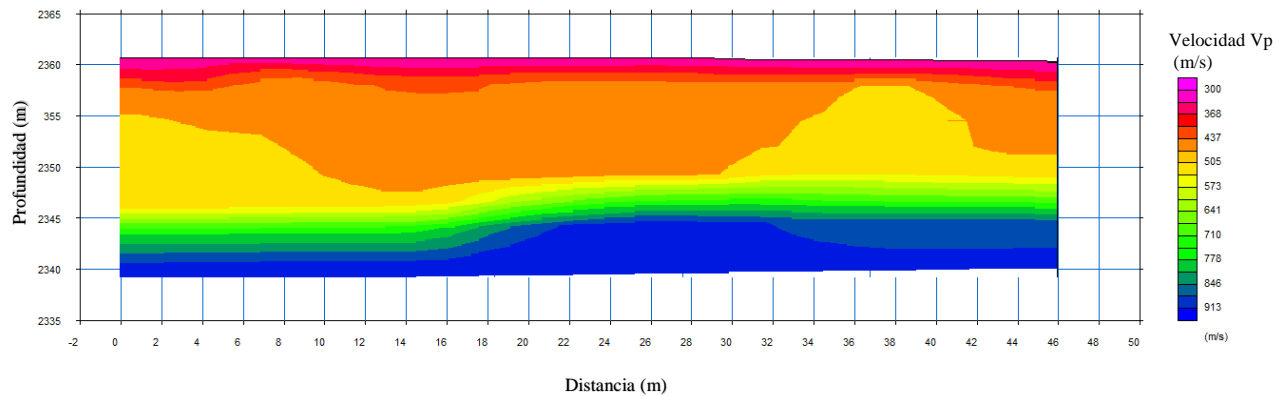


Figura 25: Tomografía de la línea 2.

Fuente: Plotrefa y editado.

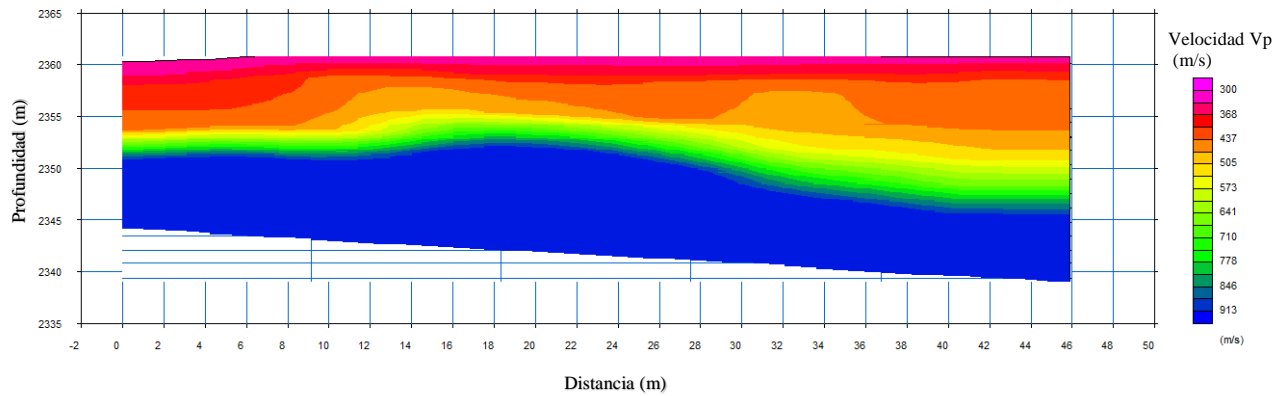


Figura 26: Tomografía de la línea 1.
Fuente: Plotrefa y editado.

6.4.2. MASW-1D.

Tabla 5: Resultados de MASW-1D.

Velocidades de onda S (MASW-1D)				
# de línea	línea 1	línea 2	línea 3	línea 4
profundidad (m)	velocidad (m/s)	velocidad (m/s)	velocidad (m/s)	velocidad (m/s)
0.7	223	234	236	232
1.5	223	234	233	231
2.5	225	234	229	230
3.5	234	241	232	234
4.7	261	266	260	257
5.9	294	296	281	295
7.3	301	311	316	316
8.8	302	325	329	332
10.4	311	331	339	348
12.1	328	353	345	356
13.9	348	375	369	383
15.8	394	417	373	420
17.9	425	468	422	459

Fuente: softwares utilizados y editado.

6.4.3. MAW-2D.

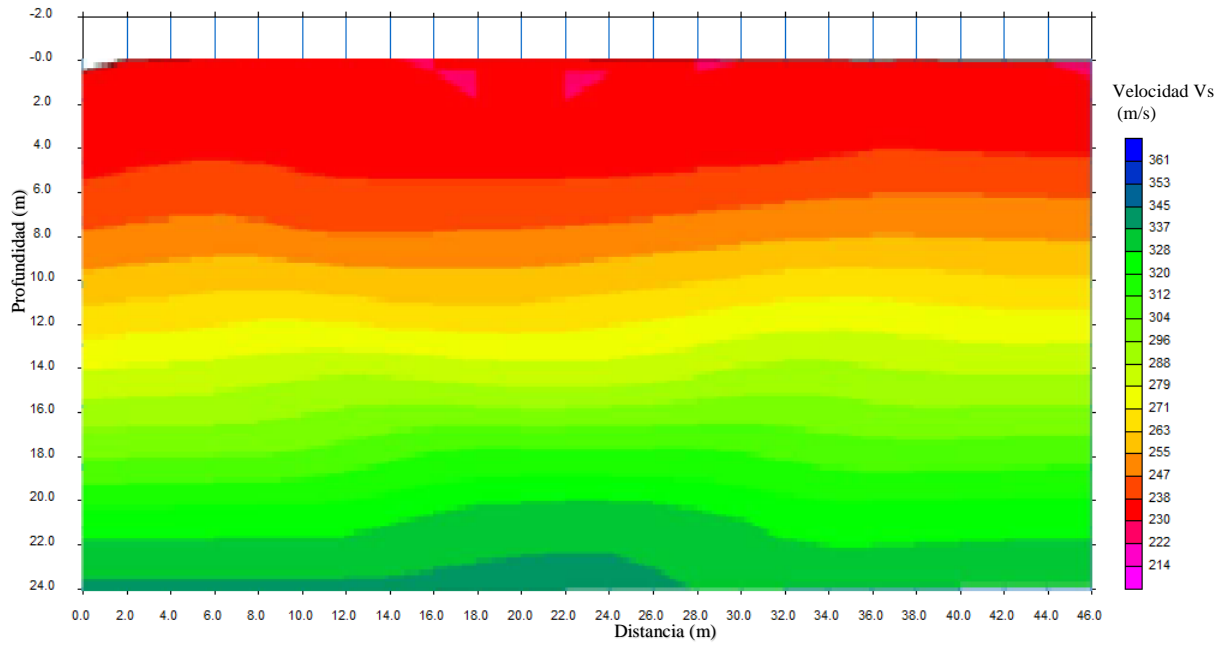


Figura 27: Tomografía de MASW-2D.
Fuente: Geoplot y editado.

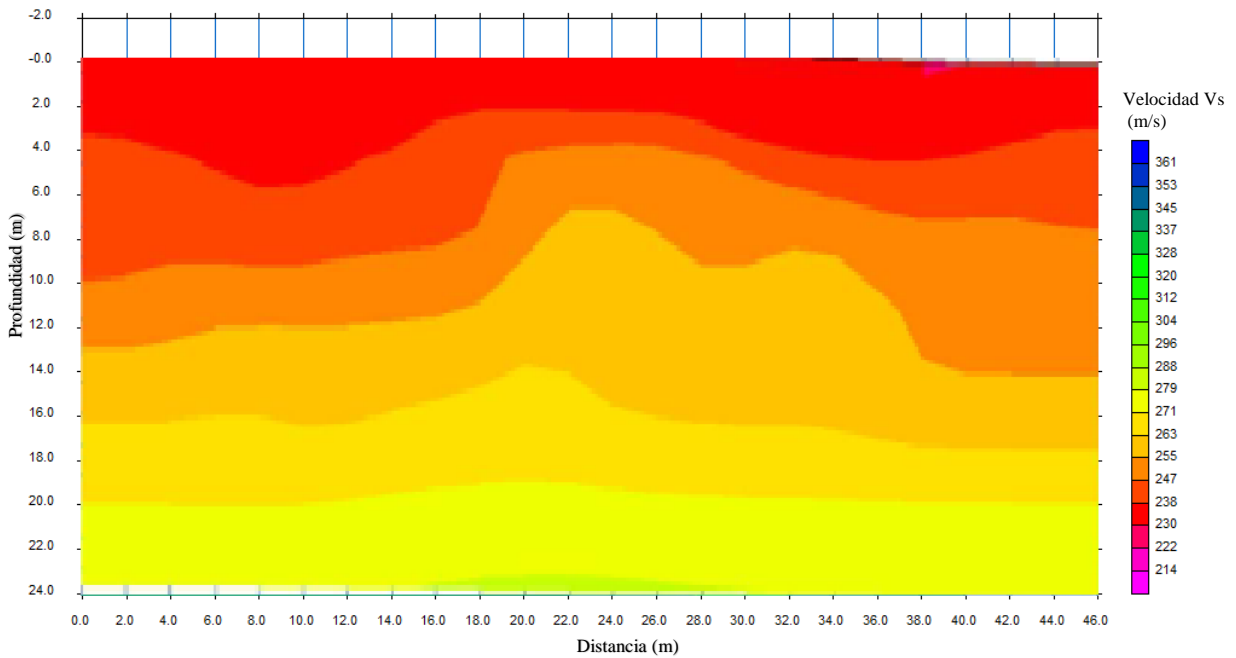


Figura 28: Tomografía de MASW-2D.
Fuente: Geoplot y editado.

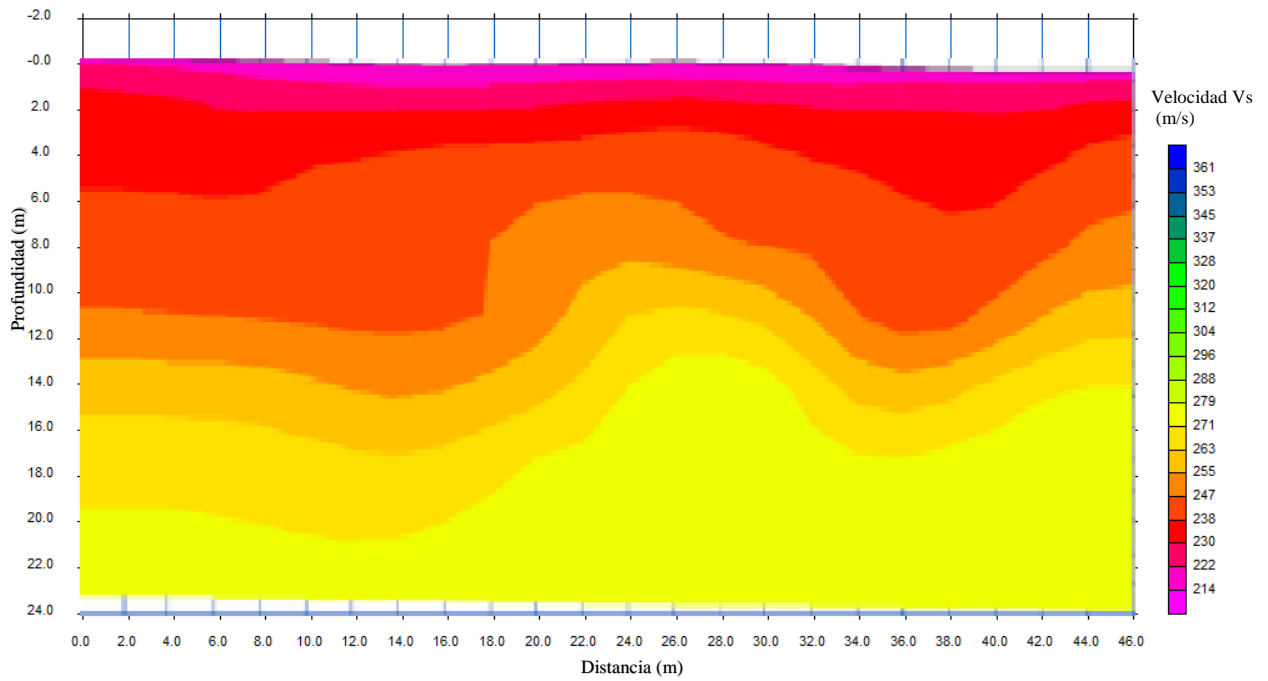


Figura 29: Tomografía de MASW-2D.
Fuente: Geoplot y editado.

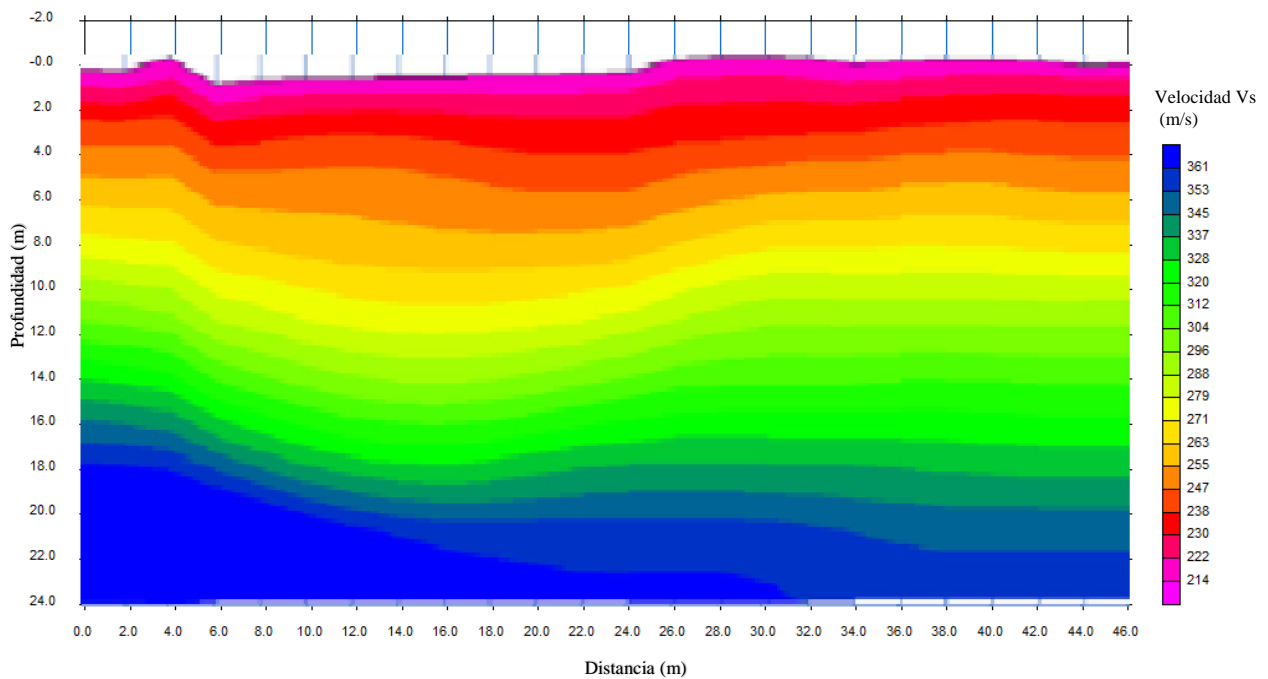


Figura 30: Tomografía de MASW-2D.
Fuente: Geoplot y editado.

6.4.4. Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

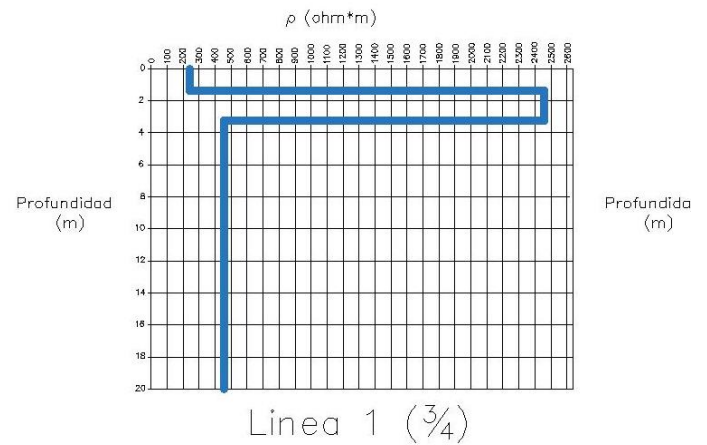
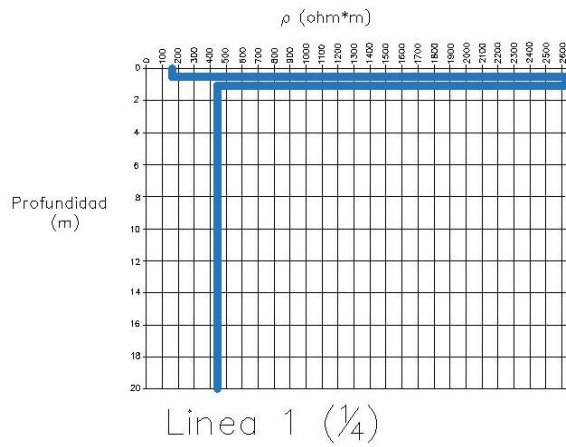


Figura 31: Sondeos eléctricos verticales línea 1.
Fuente: softwares utilizados y editado.

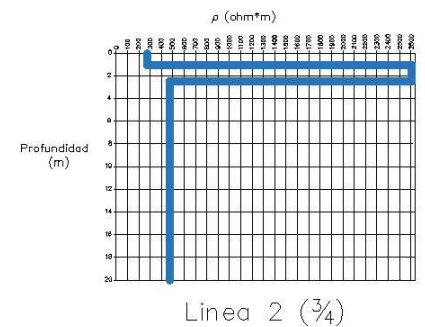
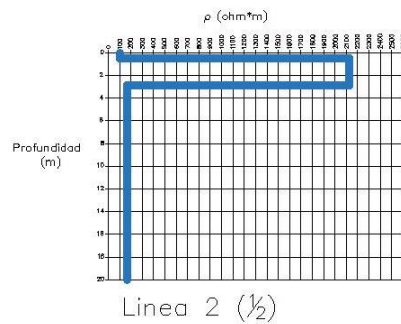
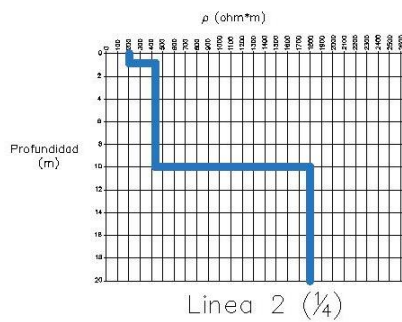


Figura 32: Sondeos eléctricos verticales línea 2.
Fuente: softwares utilizados y editado.

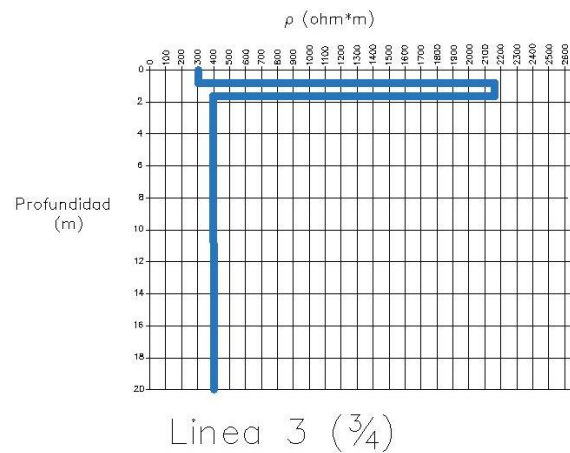
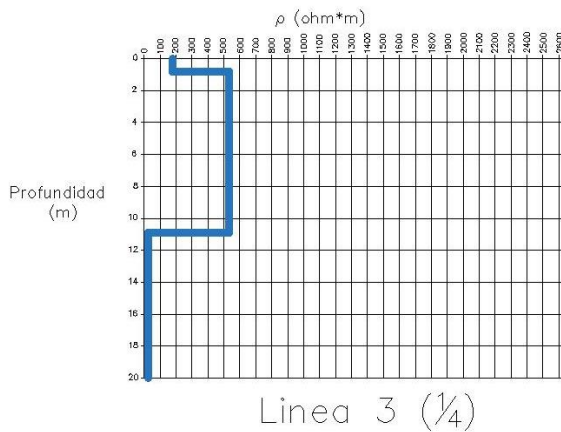


Figura 33: Sondeos eléctricos verticales línea 3.
Fuente: softwares utilizados y editado.

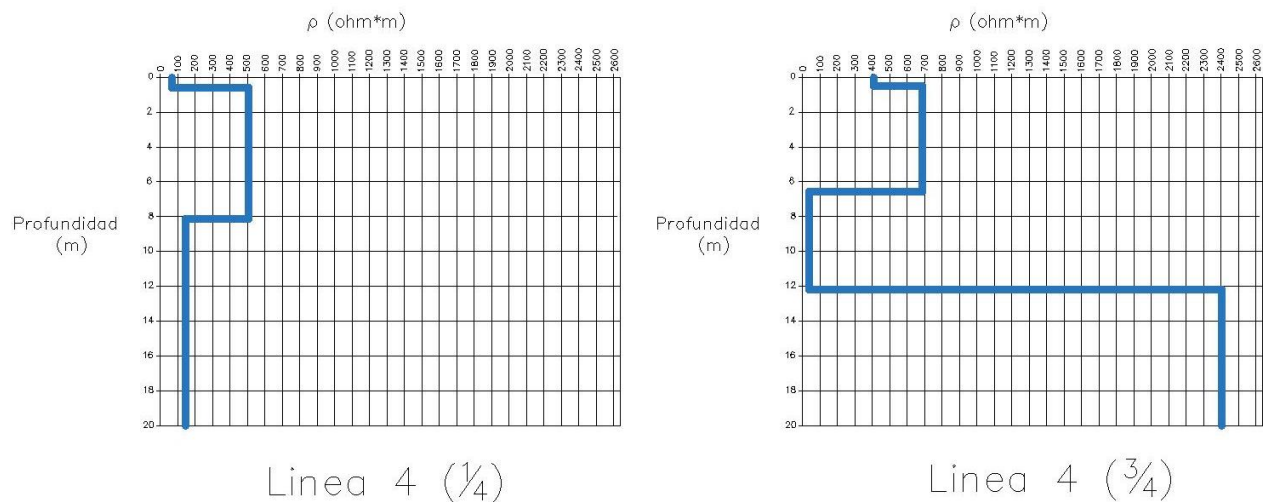


Figura 34: Sondeos eléctricos verticales línea 4.
Fuente: softwares utilizados y editado.

6.4.5. Ensayo de penetración estándar (SPT).

Tabla 6: Corrección del ensayo de SPT perforación 1.

Perforación 1						
N° de muestra	# de golpes	CER	CB	CS	CR	N(60)
muestra 1	6	0.75	1	1	0.75	6
	7	0.75	1	1	0.75	7
	6	0.75	1	1	0.75	6
muestra 2	7	0.75	1	1	0.75	7
	5	0.75	1	1	0.75	5
muestra 3	6	0.75	1	1	0.75	6
	15	0.75	1	1	0.75	14
	15	0.75	1	1	0.75	14
muestra 4	11	0.75	1	1	0.75	10
	13	0.75	1	1	0.75	12
	24	0.75	1	1	0.75	23
muestra 5	19	0.75	1	1	0.75	18
	20	0.75	1	1	0.75	19
	rechazo					

Fuente: Autor.

Tabla 7: Corrección del ensayo de SPT perforación 2.

Perforación 2						
N° de muestra	# de golpes	CER	CB	CS	CR	N(60)
muestra 1	9	0.75	1	1	0.75	11
	16	0.75	1	1	0.75	20
	9	0.75	1	1	0.75	11
muestra 2	7	0.75	1	1	0.75	9
	17	0.75	1	1	0.75	21
	20	0.75	1	1	0.75	25
muestra 3	14	0.75	1	1	0.75	18
	17	0.75	1	1	0.75	21
	14	0.75	1	1	0.75	18
muestra 4	9	0.75	1	1	0.75	11
	8	0.75	1	1	0.75	10
	6	0.75	1	1	0.75	8
muestra 5	5	0.75	1	1	0.75	6
	5	0.75	1	1	0.75	6
	5	0.75	1	1	0.75	6
muestra 6	9	0.75	1	1	0.75	11
	8	0.75	1	1	0.75	10
	9	0.75	1	1	0.75	11
muestra 7	12	0.75	1	1	0.75	15
	11	0.75	1	1	0.75	14
	10	0.75	1	1	0.75	13
muestra 8	11	0.75	1	1	0.75	14
	10	0.75	1	1	0.75	13
	9	0.75	1	1	0.75	11
muestra 9	11	0.75	1	1	0.75	14
	11	0.75	1	1	0.75	14
	15	0.75	1	1	0.75	19

Fuente: Autor.

6.5. Análisis.

6.5.1. Geofísicos.

Con los métodos geofísicos, utilizados (TRS, MASW-1D, MASW-2D, y SEV), se determina las posibles velocidades de propagación de las ondas S y P en el terreno, con dichas velocidades se puede obtener algunas propiedades del suelo como son: densidad, módulo de corte, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, módulo de Young, capacidad de carga, expresados matemáticamente en la tabla 6. (Aviles,2016)

La caracterización básica del perfil del suelo se establece en términos de los valores de velocidad de onda de corte V_s con la profundidad y su variación horizontal, hasta el nivel de roca (rechazo en el ensayo SPT), o suelos duros ($V_s > 500$ m/s) mediante ensayos geofísicos en el terreno. Adicionalmente, de manera complementaria para efectos de caracterización de la variación espacial, o para evaluar los rangos de valores de las propiedades relevantes, se pueden utilizar correlaciones debidamente soportadas con otros parámetros geotécnicos. Estas correlaciones no pueden reemplazar las mediciones directas en el terreno. Ver la tabla 8.

Tabla 8:Correlaciones de las ondas S y P, con los parámetros geotécnicos.

Determinación de los parámetros geotécnicos a partir de las S y P.		
Densidad	$\gamma = 4.3 * V_s^{0.25}$ $\rho = \gamma / g$	
Coficiente de Poisson	$\mu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2((V_p/V_s)^2 - 1)}$	
Módulo de Young	$E_{din} = 2(1 + \mu) * G_{din}$	
Módulo de elasticidad estático	$E_{est} = (0.09346 * E_{din}) + 4$	
Capacidad de carga	$\beta = 1.00; 0 < B < 1.2 m$	$q_a = \frac{0.025 \gamma V_s \beta}{n}$
	$\beta = 1.13 - 0.11B; 1.2 < B < 3.0m$	
	$\beta = 0.83 - 0.01B; 3.0 < B < 12 m$	

Fuente: Avilés, 2006.

Siendo los resultado semejantes a las ecuaciones de terzagui (1943) y la expresión empírica de tezcant et al (2006). (Avilés, 2006).

Tabla 9: Correlaciones geotécnicas por métodos geofísicos.

Línea 1									
profundidad (m)	velocidad Vp (m/s)	velocidad Vs (m/s)	densidad (KN/m ³)	módulo de corte(KN/m ²)	coeficiente de poisson (KN/m ²)	módulo de young (KN/m ²)	módulo de elasticidad estático (KN/m ²)	capacidad carga (KN/m ²)	
								n	q
2	276	234	16.82	93883.38	0	41308.69	3864.71	4	0.105
4	453	250	17.1	108944.95	0.28	278899.07	26069.91	4	0.107
6	629	297	17.85	160502.61	0.36	436567.1	40805.56	4	0.112
8	805	300	17.9	164220.18	0.42	466385.31	43592.37	4	0.112
10	981	308	18.01	174159.09	0.45	505061.36	47207.03	4	0.113
12	1158	328	18.3	200691.87	0.46	586020.26	54773.45	4	0.114
14	1422	348	18.57	229245.8	0.47	673982.65	62994.42	4	0.116
16	1598	394	19.16	303192.84	0.47	891386.95	83313.02	4	0.12
18	1686	425	19.52	359408.77	0.47	1056661.78	98759.61	4	0.122

Fuente: Autor.

Tabla 10: Correlaciones geotécnicas por métodos geofísicos.

Línea 2									
profundidad (m)	velocidad Vp (m/s)	velocidad Vs (m/s)	densidad (KN/m ³)	módulo de corte(KN/m ²)	coeficiente de poisson (KN/m ²)	módulo de young (KN/m ²)	módulo de elasticidad estático (KN/m ²)	capacidad carga (KN/m ²)	
								n	q
2	254	220	16.56	81702.75	0	0	4	4	0.104
4	355	243	16.98	102207.14	0.06	216679.14	20254.83	4	0.106
6	400	254	17.17	112919.44	0.16	261973.1	24488.01	4	0.107
8	460	243	16.98	102207.14	0.31	267782.71	25030.97	4	0.106
10	559	312	18.07	179307.45	0.27	455440.92	42569.51	4	0.113
12	661	346	18.55	226374.29	0.31	593100.64	55435.19	4	0.116
14	762	381	19	281147.71	0.33	747852.91	69898.33	4	0.119
16	1068	391	19.12	297969.9	0.42	846234.52	79093.08	4	0.12
18	1271	391	19.12	297969.9	0.45	864112.71	80763.97	4	0.12

Fuente: Autor.

Tabla 11: Correlaciones geotécnicas por métodos geofísicos.

Línea 3									
profundidad (m)	velocidad Vp (m/s)	velocidad Vs (m/s)	densidad (KN/m ³)	módulo de corte(KN/m ²)	coeficiente de poisson (KN/m ²)	módulo de Young (KN/m ²)	módulo de elasticidad estático (KN/m ²)	capacidad carga (KN/m ²)	
								n	q
2	254	219	16.54	80863.91	0	8086.39	759.75	4	0.103
4	355	256	17.2	114905.12	0	220617.83	20622.94	4	0.108
6	461	272	17.46	131677.94	0.23	323927.73	30278.29	4	0.109
8	661	298	17.87	161766.31	0.37	443239.69	41429.18	4	0.112
10	710	350	18.6	232263	0.34	622464.84	58179.56	4	0.116
12	763	377	18.95	274550.92	0.34	735796.47	68771.54	4	0.118
14	864	388	19.08	292801.17	0.37	802275.21	74984.64	4	0.119
16	966	403	19.27	319023.59	0.39	886885.58	82892.33	4	0.12
18	1068	403	19.27	319023.59	0.42	906027	84681.28	4	0.12

Fuente: Autor.

Tabla 12: Correlaciones geotécnicas por métodos geofísicos.

Línea 4									
profundidad (m)	velocidad Vp (m/s)	velocidad Vs (m/s)	densidad (KN/m ³)	módulo de corte(KN/m ²)	coeficiente de poisson (KN/m ²)	módulo de Young (KN/m ²)	módulo de elasticidad estático (KN/m ²)	capacidad carga (KN/m ²)	
								n	q
2	286	208	16.33	72018.46	-0.06	135394.7	12657.99	4	0.102
4	456	218	16.52	80030.22	0.35	216081.59	20198.99	4	0.103
6	710	232	16.78	92065.92	0.44	265149.85	24784.9	4	0.105
8	1068	304	17.96	169193.82	0.46	494045.95	46177.53	4	0.112
10	1169	339	18.45	216135.83	0.45	626793.91	58584.16	4	0.115
12	1475	376	18.94	272952.24	0.47	802479.59	75003.74	4	0.118
14	1678	387	19.07	291141.17	0.47	855955.04	80001.56	4	0.119
16	1779	400	19.23	313639.14	0.47	922099.07	86183.38	4	0.12
18	1881	411	19.36	333364.99	0.47	980093.07	91603.5	4	0.121

Fuente: Autor.

Tabla 13: Correlaciones geotécnicas por SPT.

Parámetros geotécnicos (SPT)							
Perforación 2.							
profundidad (m)	N(60)	velocidad Vs (m/s)	densidad (KN/m ³)	módulo de corte (KN/m ²)	Angulo de fricción	módulo de Young (KN/m ²)	capacidad carga (KN/m ²)
0.4572	31	170.00	10.49	0	12.17	0	173.9
0.9144	46	217.33	15.675	0	13.2	0	164.91
1.3716	39	231.00	14.89	106.33	35	58.67	582.71
1.8288	18	210.33	6.525	60.33	31.4	41.87	538.8
2.286	12	201.33	4.85	45	29.4	34.6	315.13
2.7432	21	233.67	8.36	67.33	31.77	44.03	403.58
3.2004	27	253.33	12.04	81.33	32.8	48.52	480.28
3.6576	24	253.67	10.745	75.67	32.2	46.17	536.14
4.1148	33	280.00	16.975	99	33.97	53.35	610.92

Fuente: NOVO SPT y editado.

Tabla 14: Correlaciones geotécnicas por SPT.

Parámetros geotécnicos (SPT).							
Perforación 1.							
profundidad (m)	N(60)	velocidad Vs (m/s)	densidad (KN/m ³)	módulo de corte (KN/m ²)	Angulo de fricción	módulo de Young (KN/m ²)	capacidad carga (KN/m ²)
0.4572	17	161.33	5.91	61.41	34.87	34.06	254.89
0.9144	12	156.67	3.85	57.51	33.5	31.62	387.4
1.3716	33	220.67	12.21	88.63	37.63	46.16	703.72
1.8288	54	264	20.08	112.69	39.67	57.48	1091.49

Fuente: NOVO SPT y editado.

7. Intercepto en tres dimensiones.

7.1. Intercepto de TRS.

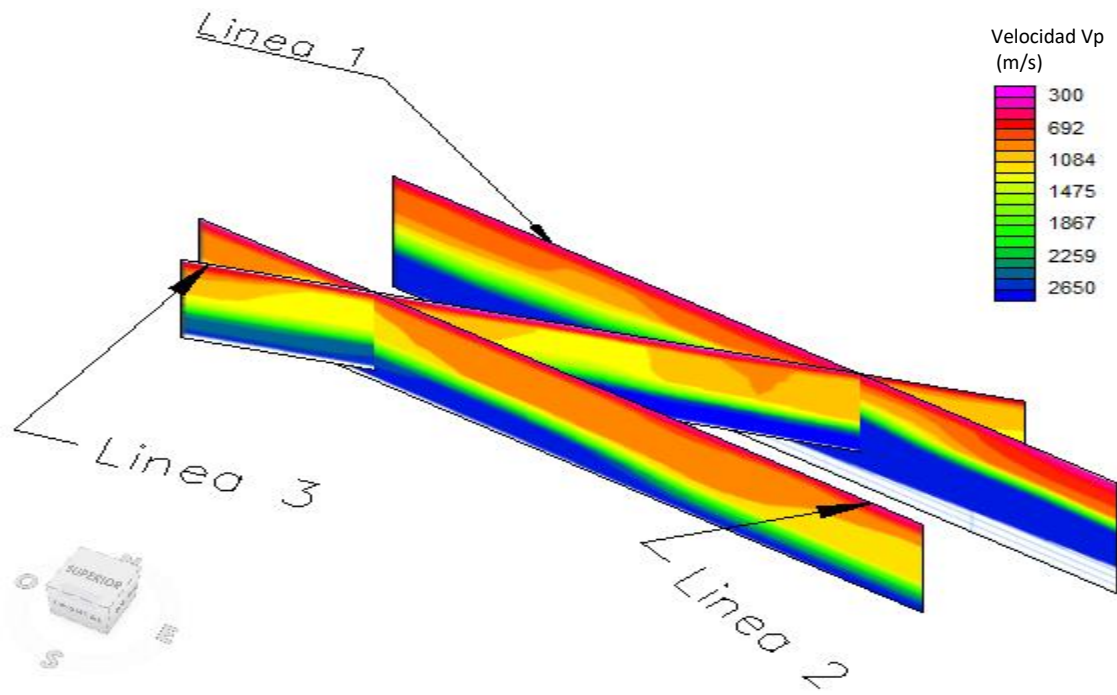


Figura 35: Intercepto de las líneas 1 2 y 3; TRS.

Fuente: Autor.

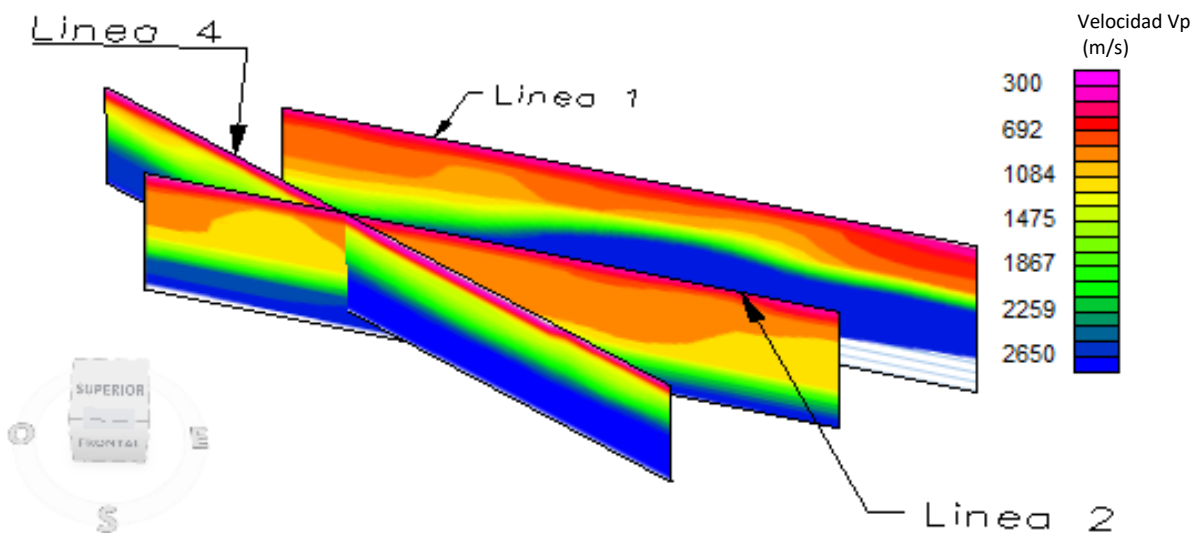


Figura 36: Intercepto de las líneas 1 2 y 4; TRS.

Fuente: Autor.

7.2. Intercepto de MASW-2D.

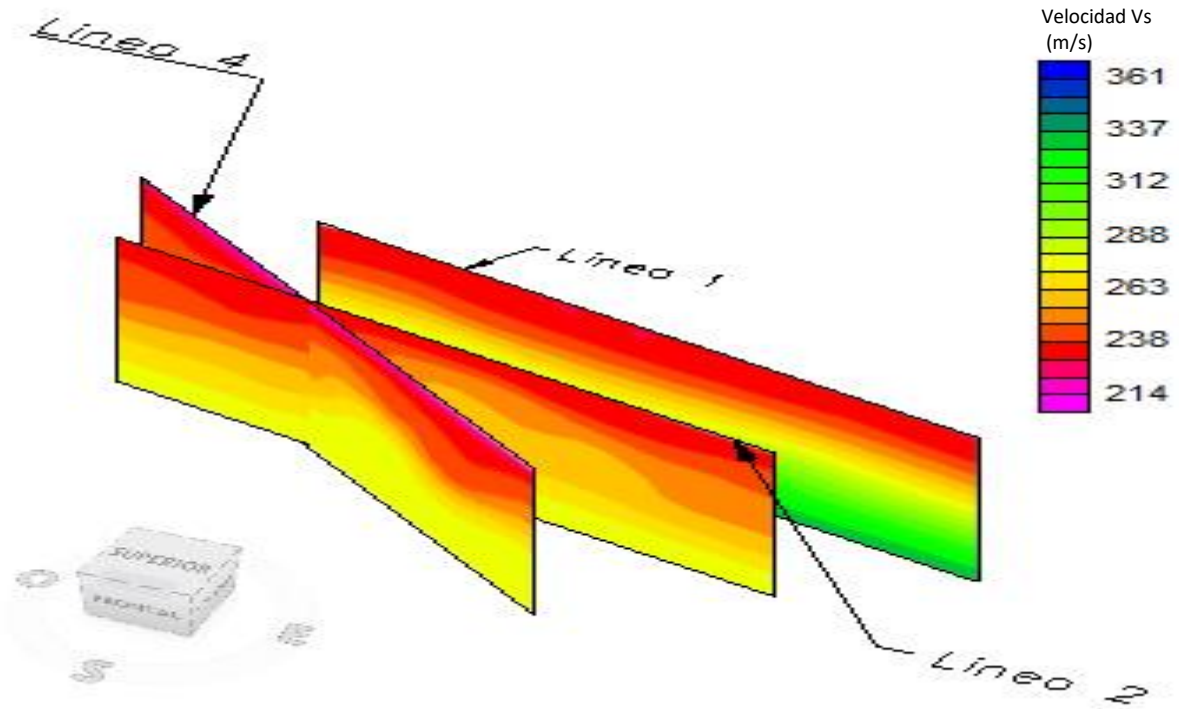


Figura 37: Intercepto de las líneas 1 2 y 4; MASW-2D.
Fuente: Autor.

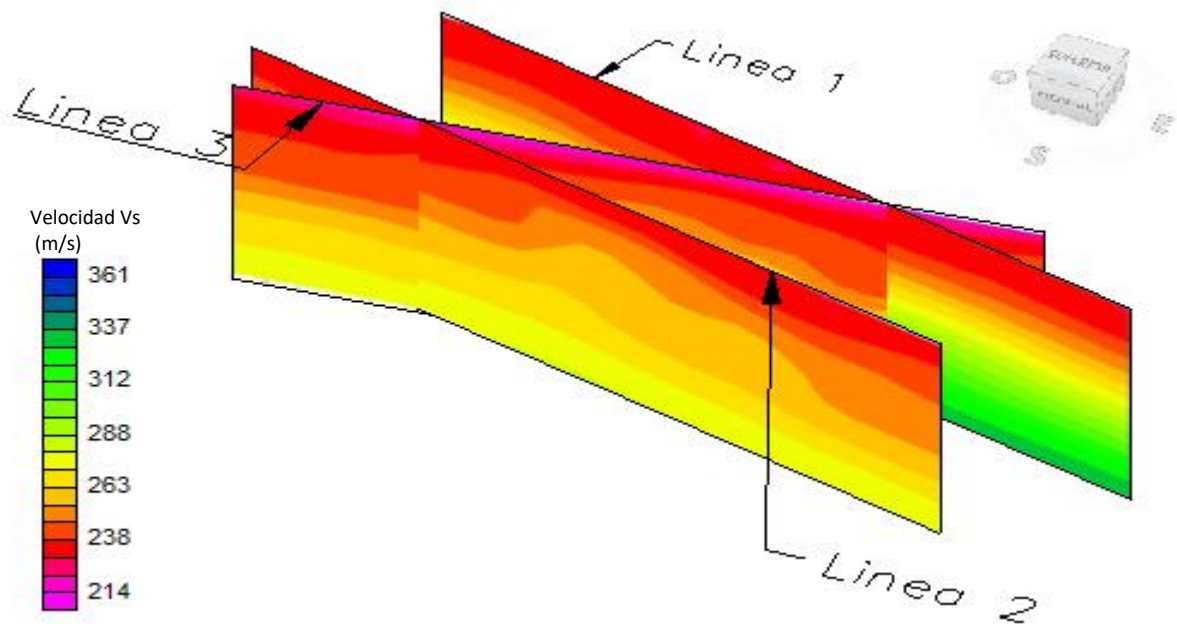


Figura 38: Intercepto de las líneas 1 2 y 3; MASW-2D.
Fuente: Autor.

8. Conclusiones.

- La profundidad máxima promedio obtenida fue de 16 m, influyendo en esta profundidad la distancia de la línea, el espaciamiento entre geófonos, y la energía que proporciona la fuente.
- Por los métodos utilizados se verifica que la zona en estudio, es un suelo con velocidades de onda P, determinadas por el ensayo de tomografía de refracción sísmica (TRS), son bajas, están entre el rango de 145-400 m/s, para una profundidad de 0 a 4 m, entre el rango de profundidad de 4 a 8 m, un intervalo de velocidades entre 400- 800 m/s, y de 8 m a 16 m de profundidad máxima promedio alcanzada por los métodos nos presentan suelos con características de arena y relleno de características anisotrópicas, confirmado por la clasificación del suelo obtenida mediante el ensayo de penetración estándar.
- Las técnicas geofísicas resultan muy exactas a la hora de establecer profundidades de los estratos, mientras que, el método SPT, permite determinar (como un método invasivo) las características de cierto estrato, a cierta profundidad, o a la profundidad a la cual se realice la perforación. De ahí que, la geofísica determina las características geotécnicas generales de un terreno, a diferencia del método SPT, que solo nos permite determinar las características del terreno, pero en cierto punto en particular, esto no resultado del todo exacto, cuando se analizan suelos de material heterogéneo, como el que se encuentra en el parqueadero del patínodromo municipal, de Pamplona, Norte de Santander.
- Se ha podido reconocer, investigar, y analizar los suelos que se encuentran en el parqueadero del patínodromo municipal del municipio de Pamplona Norte de Santander, y como los métodos geofísica pueden ayudar a realizar una caracterización de un suelo de forma más rápida y menos costosa, aún si se trata de un suelo heterogéneo, anisotrópico y de características areno arcillosa con escombros, sin embargo, el crecimiento urbano de la municipio no está concentrado en este sector, sino en sus alrededores. Nuestra recomendación, para futuros estudios que se realicen, es hacer el mismo análisis, pero en zonas de expansión urbana.
- En el ensayo de penetración nos arroja un rechazo aproximadamente a 1.82 m, el cual se debe considerar, no representativo, debido a que las características geológicas y de otros estudios geotécnicos no se encuentra suelo con estas características.
- Los Sondeos Eléctricos Verticales SEV, nos arroja resistividades pertenecientes a rocas fracturadas, gravas saturadas, a una profundidad entre los 2 y 3 m, y más profundo arroja resistividades de arcillas saturadas, arenas, y limos, con los que nos indica que el primer estrato es de un material resistivo, concluyendo que la primera capa está compuesta por escombros y de material excavado siendo compactado por el tránsito de vehículos.

9. Referencias.

- Aceves, A. A. (2003). geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. sanfandilia, Querétaro, México: Instituto Mexicano del transporte.
- Arias, D. E. (2011). Exploración geotécnica- Relaciones Geoeléctrica. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- CORPONOR. (2002). Plan de Básico Ordenamiento Territorial. Pamplona. Colombia: Norte de Santander.
- Invias 111-07. (2013). Ensayo de Penetración Normal (SPT) y Muestreo de Suelos con Tubo Partido. Bogotá. Colombia: I.N.V.I.A.S.
- Invias 125-07. (2013). Determinación del Limite liquido de los Suelos. Bogotá, Colombia: I.N.V.I.A.S.
- I.N.V.E-126-07. (2013). Limite Plástico e Índice de plasticidad de los Suelos. Bogotá, Colombia: I.N.V.I.A.S.
- I.N.V.E-213-07. (2013). Análisis Granulométrico de Agregados Gruesos y Finos. Bogotá, Colombia: I.N.V.I.A.S.
- (avilés, 2016). Juan Femando Avilés Tapia, B. I. (2016). Caracterización de los Suelos del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Rosales, C. (2001). comportamiento sísmico de los suelos del área de cañaveralejo, Cali, Colombia. cañaveralejo, Cali, Colombia: universidad del Valle.
- Villamil, W. (07 de mayo de 2017). Scribd. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/document/347602237/Pamplona-Norte-de-Santander-Geologia-y-Morfologia>.
- (salvador, 2012). Salvador Lazcano, perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara. Guadalajara: sociedad mexicana de ingeniería geotécnica A.C., pp. 2-3. 2012.
- (nicolle, 2015). Nicolle Andrés Correira Machuca. obtención del perfil de velocidad de onda de corte mediante método masw y comparación con ensayo tipo downhole en estaciones sismológicas de zona central. departamento de ingeniería civil ed. Santiago de chile: universidad de chile facultad de ciencias físicas y matemáticas. 2015.
- (felix, 2007). Félix Humberto Mejía, Pedro Alfonso Vega Vega, Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica. Medellín, Colombia: concier. 2007.
- (Maturano, 2008). Jorge Paredes Maturano, Datos e interpretación de sondeos eléctricos verticales (SEV) en áreas rurales de los departamentos de beni y pando en la república de Bolivia. santa cruz- Bolivia: hidrogeólogo. 2008.