

# ANÁLISIS DE ESTUDIOS GEOFÍSICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN LA VÍA PAMPLONA- BUCARAMANGA. ZONA EL BUQUE, PAMPLONA (NORTE DE SANTANDER)

C.S Bravo<sup>1</sup>, M.Y Ramirez<sup>1</sup>, G.D Romero<sup>1</sup>, J.A. Torres<sup>2</sup>, D.A. Gutierrez<sup>3</sup>, M.A. Contreras<sup>1</sup>, J.C. Gomez<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Ingeniería Civil (ETENOHA), Universidad de Pamplona, Norte de Santander, Colombia

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Geofísica y Geología (PANGEA), Universidad de Pamplona, Norte de Santander, Colombia

<sup>3</sup> Grupo de Investigación en Geofísica y Ciencias de la Computación (GGC3), Instituto Tecnológico Metroplitano, Medellín, Antioquia, Colombia

<sup>4</sup> Hydroingeniería, Bucaramanga, Santander, Colombia

## RESUMEN

En el nororiente colombiano, influenciado por la orogenia Andina, en el municipio de Pamplona, se encuentran fallas activas como lo es la formación Tibú-Mercedes, Aguardiente y la falla de Chitagá de tipo inverso con rumbo norte-sur con fuerte control estructural que geomorfológicamente da origen a lomas y cuchillas con presencia de rocas metamórficas de tipo ígneo, la cual evidencia predominantes formaciones de biotita de grano grueso, plagioclasas, cuarzo y cristales grandes de feldespato rosado. Por medio del análisis realizado con las pruebas de campo, se busca caracterizar geotécnicamente el subsuelo mediante la aplicación de estudios de refracción sísmica que mide la velocidad de las ondas transmitidas por el sustrato del suelo, la tomografía de resistividad eléctrica que determina la resistividad al flujo de corriente que compone un terreno y el ensayo de penetración estándar con el cual se cuantifica la capacidad portante del suelo y otras características producto de pruebas de laboratorio como lo es el ensayo de humedad y parafina, para obtener las propiedades de este, profundidades de los respectivos estratos e incidencia de las fallas geológicas presentes en la zona para la creación de asentamientos; la aplicación de cada uno de estos métodos tiene como finalidad complementarse conjuntamente y así conseguir un establecimiento verás de las características del subsuelo en la ladera que es objeto de estudio.

**Palabras clave:** MASW, Ensayo de Penetración Estándar (SPT), Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).

## ABSTRACT

In the north-east of Colombia, influenced by the Andean orogeny, in the municipality of Pamplona, there are active faults such as the Tibú-Mercedes formation, Aguardiente and the Chitagá fault of the inverse type with north-south course with strong structural control that geomorphologically gives origin to hills and blades with presence of igneous metamorphic rocks, which shows predominant formations of coarse grain biotite, plagioclase, quartz and large crystals of pink feldspar. By means of the analysis carried out with the field tests, it is sought to characterize the subsoil geotechnically by the application of seismic refraction studies that measure the velocity of the waves transmitted by the soil substrate, the electrical resistivity tomography that determines the resistivity to the flow of current that composes a terrain and the test of standard penetration with which it is quantified the load bearing capacity of the terrain and other characteristics product of laboratory tests, to obtain the properties of this, depths of the respective strata and incidence of the present geological faults On the zone for the creation of settlements; The application of each of these methods is intended to be complemented jointly and thus get an establishment will see the characteristics of the subsoil in the slope that is the object of study.

**Keywords:** MASW, Static Penetration System (SPT, Electrical Resistivity Tomography (ERT).

## 1 INTRODUCCIÓN

La prospección geofísica es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas aplicadas a la exploración del subsuelo, resolviendo las condiciones físicas, mecánicas de la estructura geológica del terreno, estos procesos nos permiten un análisis y caracterización del mismo. La prospección geofísica en el área de ingeniería civil utiliza las técnicas como: la refracción sísmica, que tiene como objetivo determinar la velocidad de propagación de la onda emitida artificialmente a través de los sustratos del suelo, con el fin de conocer su estructura y composición permitiendo determinar las características geotécnicas del terreno (FIGURA 1); siendo útil en la ingeniería civil y ramas afines a esta, solucionando problemas que conllevan la ejecución de construcciones. (Rubina F, 2003).

La resistividad de la roca está relacionada con la porosidad y el contenido de agua, que son parámetros que nos ayudan en este tipo de investigación, cuyo objetivo es determinar la diversidad de capas existentes, su profundidad bajo el recubrimiento superficial del terreno alterado y meteorizado.

La técnica de análisis multicanal de ondas, es un método no destructivo, se usa para evaluar la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), analiza las propiedades de esparcimiento de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores. (Georgys I, 2016).

Por ultimo tenemos el ensayo de penetración estándar (SPT), desarrollado por Terzagui a finales de los años 20, es el ensayo in situ más conocido y económico para obtener información geotécnica del subsuelo. (Cruz L, 2014)

Estas cuatro técnicas nos arrojan resultados en los cuales se puede mostrar las características de la capa somera del suelo desde puntos de vistas distintos, entrelazándolos entre sí para tener una mejor perspectiva del terreno, mejorando las descripciones y evidenciando las deformaciones e inconsistencias que este ha sufrido por agentes externos y por procesos internos del mismo.

## 2 MARCO GEOLÓGICO

Colombia esta situada, dentro del marco tectónico global, en la placa suramericana que sufre un proceso de separación de la placa africana. El vestigio de esa separación es una sutura en el piso del océano Atlántico originando un fenómeno de expansión.

Por esta en la esquina noroccidental de la placa suramericana, Colombia se encuentra en un sitio de choque entre placa Pacífica, oceánica, y el borde de la placa suramericana; allí la placa Pacífica empieza a penetrar debajo e ella, en un evento conocido como subducción. La placa del Caribe también presenta una zona de



FIGURA 1. Zona de estudio, Pamplona, (Google Maps, Esc 1:30.000)

La técnica de tomografía de resistividad eléctrica tiene como fin determinar la distribución de la conductividad mediante medidas superficiales, las cuales se realizan induciendo corriente al terreno a través de un par de electrodos “corriente” y midiendo la diferencia de potencial creada entre otro par de electrodos “potencial”. (<http://geofisicaexploraciones.com/metodos-y-tecnicas/>).

subducción y penetra a una velocidad de 1 a 2 cm por año, la placa Pacífica penetra a una velocidad mayor, 6 cm/año.

Este juego de movimientos de placas produce una serie de fallas de sentido SE-NW, como las fallas de Romeral, Cauca-Patía, Soapaga y la del borde de la cordillera Oriental. También se origina fallas de rumbo, como la falla de Bucaramanga-Santa Marta. Debido a las fallas se genera mucho esfuerzo y acumulación de energía que, al

liberarse, da origen a un considerable número de sismos en la zona. (Navas Camacho, 2012)

## 2.1 Geología de la Zona de Estudio

Desde el punto de vista geológico estructural, Pamplona desarrolla su urbanismo sobre depósitos cuaternarios de origen fluvioalustre depositados discordantemente sobre rocas ígneas tipo gneis cuarzomonzonítico pertenecientes a la unidad Ortoneis, estructuralmente el casco urbano de Pamplona se encuentra enmarcado en una zona de tectónicas compresiva generada en la evolución de la cordillera Oriental (PBOT, 2015), la cual produce estructuras con dirección norte-sur que afectan las diferentes litologías presentes. (FIGURA 2)

A escala local, se presentan fallas de tipo normal con dirección este-oeste que fracturan las rocas de la formación Aguardiente y la formación Tibu-Mercedes en el cerro de Cristo Rey, generando un alto fracturamiento del macizo rocoso que puede heredar planos de falla a los depósitos cuaternarios de la zona de influencia. (PBOT, 2015)

La fuerte tectónica afecta los macizos rocosos de la Unidad Ortoneis produciendo fuerte fracturamiento que acelera los procesos de meteorización. (PBOT, 2015)

competencia de la roca, como también para detección de fallas geológicas.

Este método mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. Para esto se disponen en superficie una serie de sensores (geófonos) en línea recta a distancias conocidas, formando lo que se conoce como tendido sísmico o línea de refracción. (Telles Julia, 2006)

A una distancia conocida del extremo del tendido, en el punto de disparo, se generan ondas sísmicas con la ayuda de un martillo las cuales inducen vibraciones en el terreno que se propagan por el subsuelo y que son detectadas por cada uno de los sensores en el tendido. Los registros de cada sensor tienen información de la respuesta del terreno en función del tiempo y son conocidos como sismogramas. (Perez M, 2013)

Estas trazas son analizadas en la refracción sísmica para obtener el tiempo de llegada de las primeras ondas de cuerpo a cada sensor desde el punto de disparo. Estos son analizados en la refracción sísmica para obtener el tiempo de llegada de las primeras ondas a cada geófono desde el punto de disparo, y en la reflexión para obtener información de las ondas reflejadas en las interfaces de suelo, para lo cual es estudiado el sismograma completo. (Pérez, M. Mateo, 2013).

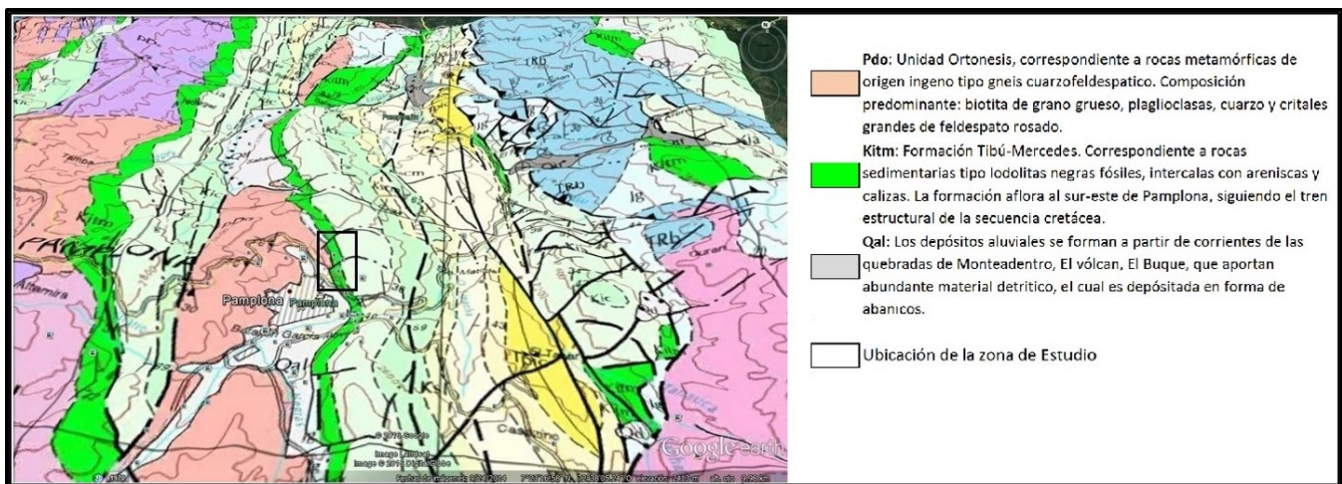


FIGURA 2. Geología regional del área de estudio (Google Earth)

## 2.2 Estratigrafía

En el municipio de Pamplona afloran rocas metamórficas del proterozoico tardío al paleozoico y rocas sedimentarias del Cretáceo inferior pertenecientes a la Cuenca de Maracaibo.

Los Depósitos Cuaternarios se encuentran ampliamente distribuidos en la zona cubriendo estas litologías en su mayoría son de origen denudacional, estructuralmente como Coluviones, conos de deyección y de origen fluvial como aluviones. (PBOT, 2015)

## 2.3 SÍSMICA DE REFRACCIÓN

Una de las aplicaciones del método de refracción sísmica en la ingeniería civil es el estudio del subsuelo, para la determinación de las condiciones (meteorización, fracturación, alteración) y

### 2.3.1 Alcances y Limitaciones

#### Alcance

Permite la detección de la profundidad del subsuelo y de su relieve, dependiendo de las variables como la longitud del tendido, energía de la fuente sísmica, velocidades del suelo. (Perez M, 2013)

#### Limitaciones

1) Sólo funciona cuando la velocidad de propagación de las ondas aumenta con la profundidad. En el caso de suelos con capas intermedias de menor velocidad el método arrojaría resultados erróneos.

## 2.4 MASW, ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES

La técnica de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) es un método no destructivo, se usa para evaluar la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), vinculado al mismo módulo de corte ( $G$ ). Este método analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores. (Franco Encisas, 2005)

Los registros se realizan con 24 geófonos en distancias cortas y largas desde una fuente impulsiva o vibratoria, que proporciona una redundancia estadística para medir las velocidades de fase. Los datos multicanal permiten la identificación y rechazo de los modos no fundamentales de ondas Rayleigh, permiten un proceso más efectivo para la eliminación del ruido y un proceso de recolección de datos más rápido.

La velocidad de la onda de corte ( $V_s$ ) ha sido reconocida como un factor clave para la determinación sísmica de una zona. Debido a que la velocidad de las ondas S es de propiedad dominante del modo fundamental de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh la cual tiene menor atenuación, relación señal-ruido y una inmunidad a la interferencia. ( Geotécnia y Geofísica, Enrique Encisas Franco)

### *Ventajas*

- 1) Posee un bajo costo en comparación con otras técnicas.
- 2) Permite detectar inversiones de velocidad de ondas de corte.
- 3) Permite la optimización de los esquemas de diseño de las edificaciones.
- 4) Permite la descripción estratigráfica sísmica y la profundidad de los estratos sísmicos por medio de la comparación de las ondas de corte.
- 5) Permite hacer estudios para estabilidad de taludes, estudios de canteras, estudios para presas de agua, relaves, botaderos de minerales, diseño de puentes, etc.
- 6) Constituye una alternativa muy económica para la evaluación de los parámetros elásticos del suelo de fundación, conjuntamente con los estudios de refracción sísmica. (Georys Ingenieros S.A.C, Marzo 2016)

### *Desventajas*

- 1) Presenta limitaciones impuestas por la física de propagación de ondas, difracciones, contaminación con ruidos externos muy cercanos, producto de perforaciones, tránsito de maquinaria pesada.
- 2) Para el ensayo MASW, la zona donde se coloquen los geófonos no debe tener una diferencia de cotas pronunciadas, es decir, debe ser una zona casi plana. (Encisas Franco, 2005)

## 2.5 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La tomografía eléctrica es un método de resistividad multi-electrónico, basado en la modelización 2-D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas). Las medidas de resistividad eléctrica

del subsuelo son habituales en las prospecciones geofísicas. Su finalidad es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo. Actualmente se está avanzando en la modelización 3-D. (Cepedes J, 2015).

La aparición de la tomografía eléctrica ha supuesto un salto cualitativo espectacular con respecto a los métodos de resistividad convencionales, técnicas que aunque se han utilizado durante varias décadas en estudios de filtración de agua, su limitada resolución en 2-D les confería en general un papel secundario frente a otras técnicas.

La resistividad eléctrica es un parámetro que varía en función de las características del terreno. Algunos de los factores que influyen:

- 1) El grado de saturación del terreno.
- 2) La temperatura.
- 3) Tipo de Roca
- 4) Los procesos geológicos que afectan a los materiales.

El objetivo de este método se basa en obtener una sección 2-D de gran resolución de las resistividades reales del suelo. Cuando introducimos corriente eléctrica en el terreno, esta se puede propagar de tres maneras diferentes en el subsuelo: conducción dieléctrica (asociado a materiales muy poco conductivos o aislantes), conducción electrónica (asociado a materiales con electrones libres, los metales) y conducción electrolítica (asociada al movimiento de los electrones presentes en el fluido intersticial del terreno). La conducción electrolítica es el modo de propagación más importantes, y en el que se basa los modelos de resistividad. (Pérez, M. Mateo, 2013).

### *Ventajas*

- 1) El método es totalmente automatizado lo cual nos permite tomar un gran número de medidas, tanto en profundidad como lateralmente en un breve lapso de tiempo obteniendo modelos de gran resolución en 2-D.
- 2) Este método nos permite procesar gran volumen de información de manera eficaz.
- 3) Abordar de forma eficaz problemas en terrenos con elevada complejidad estructural.

### *Desventajas*

- 1) Disponer del material requerido. A diferencia de otros métodos, la Tomografía eléctrica precisa de un equipo bastante caro.
- 2) Como pasa en todas las técnicas de resistividad eléctrica, la presencia de material muy resistivo en superficie impide un buen funcionamiento del método.

## 2.6 ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)

El ensayo de penetración estándar o SPT (del inglés Standard Penetration Test) (FIGURA 3), es un tipo de prueba de penetración dinámica, empleada para ensayar terrenos en los que se quiere realizar un reconocimiento geotécnico, este método fue desarrollado por Terzagui a finales de los años 20, es el ensayo in situ



más popular y económico para obtener información geotécnica del subsuelo. (Nuñez Mayhuasca, 2010). (ASTM-D 1586)

El fin de este ensayo es tomar varias muestras representativas del suelo con el objetivo de determinar la compacidad y la capacidad portante del subsuelo.

#### Ventajas

- 1) Se obtiene muestras de suelo significativas.
- 2) Sencillo y de bajo costo.
- 3) Funciona en la mayoría de los suelos.

#### Desventajas

- 1) No aplica en arcillas blandas y limos.
- 2) La muestra se pueden alterar por agentes externos. (Nuñez Mayhuasca, 2010)



FIGURA 3. Ensayo SPT.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 Sísmica de Refracción

El proceso empleado consiste en la caracterización de un terreno, ubicado al costado derecho de la vía Pamplona –Bucaramanga, en la parte superior de la ladera, utilizando dos líneas de 120 m de largo, una paralela a la vía con coordenadas inicial 72.646069 norte y final 7.385856 este y la otra perpendicular a esta con coordenadas inicial 72.645927 norte y final de 7.386171 este, utilizando un sísmógrafo multicanal de exploración marca Geode Geometrics (FIGURA 4) alimentada con una batería de 12 voltios y una conexión de cable de red digital de implantación vertical donde se conectan los 24 geófonos de 14 Hertz (FIGURA 5), creando un tendido sísmico sobre el área de estudio, distribuidos uno inicialmente a 10 metros y los demás a 5 metros consecutivamente, previo a ello se realizó cada uno de los perfiles de las líneas sísmicas a intervenir con un GPS garmin 76CSX. (FIGURA 6). (ASTM-D 5777)



FIGURA 4. Sísmógrafo Multicanal, Geode



FIGURA 5. Geófono

La fuente de energía emisora utilizada para la generación de la onda artificial, es una platina de 10 por 10 cm, ubicada inicialmente a un metro del primer geófono, y a su lado se conecta un tigger previamente acoplado al tendido sísmico a un metro de la platina, que lee junto con los sensores la onda generadas que se propagan por la superficie, al golpear la platina con un mazo de 16 libras diez veces consecutivamente, tomando el registro de la llegada de la onda con el computador que se encuentra conectado al geode y el cual registra los datos en el programa (Geometrics Seismodule Controller) Simulador de Controlador Geométrica donde se puede observar las ondas generadas por el mazo al crear la perturbación en el subsuelo., dichos pasos se repiten cambiando la platina en cinco puntos diferentes del tendido, a una distancia de 30 metros este trabajo se realizó para ambas líneas.



FIGURA 6. GPS garmin 76CSX, empleado en la toma de datos.

Tabla de velocidades de onda P

| MATERIALES                       | VELOCIDADES |
|----------------------------------|-------------|
| SUELOS Y ROCAS NATURALES         | m/s         |
| Material superficial meteorizado | 240 - 610   |
| Grava o arena seca               | 460 - 915   |
| Arena (saturada)                 | 1220 - 1830 |
| Arcilla (saturada)               | 915 - 2750  |
| Agua                             | 1430 - 1665 |
| Agua de mar                      | 1460 - 1525 |
| Arenisca                         | 1830 - 3960 |
| Esquisto                         | 2750 - 4270 |
| Tiza                             | 1830 - 3960 |
| Caliza                           | 2134 - 6100 |
| Granito                          | 4575 - 5800 |
| Roca metamórfica                 | 3050 - 7000 |

FIGURA 7. Margen de velocidades de propagación.

### 3.2 Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, MASW

Para la adquisición de datos para el ensayo MASW se hace generalmente igual a la que se utilizó en los estudios convencionales de refracción sísmica (FIGURA 8). Se definió el punto de sondeo sísmico en la mitad de la primera línea paralela a la vía Pamplona-Bucarmanga, luego se procede a instalar los 24 geófonos y los cables de conexión al equipo de adquisición de datos a una distancia de un metro a cada extremo del punto de sondeo sísmico.

Luego tendido la línea sísmica, se procede a generar las señales mediante la excitación del medio a través de 10 golpes sobre la placa metálica ubicada a 10 metros de cada uno de los extremos de la red para obtener el registro de ondas.



FIGURA 8. Toma de Datos, Línea paralela a la vía.

### 3.3 Tomografía de Resistividad Eléctrica

En primer lugar se procede a colocar los 41 electrodos en superficie a una profundidad de 50 cm, de forma equidistante de un metro entre sí, intentando siempre que formen una línea recta, luego se acoplan a él los jumper que van conectados a los electrodos en un extremo y en el otro al cable de conexión de red digital que previamente se acoplo al terramater ,luego de verificar que la conexión este correcta, se configura todas las variables del dispositivo: número de electrodos utilizados, distancia entre ellos, dispositivo electrónico de medida, así como el número de medidas que queremos realizar, Concluida la configuración se transfieren corriente con una batería de 12 voltios conectada previamente al cable.

Dichos pasos hacen que se interpreten los datos en el sistema multielectrónico el cual después de un tiempo pertinente nos arroja los datos, Una vez terminado todo el proceso de captura de datos, toda la información almacenada digitalmente se pasa al portátil, a fin de proceder a su procesado e interpretación con el programa correspondiente. (Diaz G, 2007).

Los perfiles de resistividad en este Proyecto han sido medidos empleando el sistema Lund de ABEM (FIGURA 9), sistema multielectrónico para estudios de resistividad en 2D y 3D.



FIGURA 9. ABEM Terramater LS.

### 3.4 Ensayo de Penetración Estándar

Se instala el trípode de tal manera que se forme un triángulo equilátero entre sus partes, para posteriormente instalar la polea en su centro que lleva una masa con un peso aproximado de 63.5 kilogramos, a una altura de 4,5 metros. Se ata la polea al motor por medio de un lazo, ya que el motor es el encargado de proveer fuerza de penetración. (FIGURA 10). (INVIAS E 111-13)



FIGURA 10. Trabajo de Campo, Ensayo SPT.

En el centro del montaje se realiza una perforación con los tubos con longitudes de penetración de 0.0 m a 0.5 m, 0.5 m a 1 m, 1 m a 2 m, 2 m a 3 m, 3 m a 4 m y por ultimo 4 m a 4.5 m; instalando la cuchara al final del montaje para extraer la muestra, Se



marca el tubo de la muestra cada 6", 12", 18" y 21" respectivamente, realizando cuatro particiones y se procede a contar el número de golpes requerido para la penetración de cada sección hasta el final. Se procede a extraer la muestra de la cuchara, se mide y almacena. (Romero García 2013).

#### Equipo Utilizado

- Trípode de acero.
- Tubos de penetración de 0,50 hasta 1,50 metros.
- Cuchara partida (molde de la muestra).
- Motor con rodillo.
- Tubo en acero para extracción de tubos de muestreo (FIGURA 11).



FIGURA 11. Tubo de muestreo.

#### Fórmulas

$$N = N_1 + N_2 \quad (1)$$

donde:

- $N_1$  es el número de golpes para penetrar las primeras 6".
- $N_2$  número de golpes para penetrar hasta 12".

$$R = N \times 4 \quad (2)$$

donde:

- $R$  es la resistencia a la penetración del terreno .

$$P = N/8 \quad (3)$$

donde:

- $P$  es presión admisible

$$\sigma = (N_1 + N_2 + N_3) / 8 \quad (4)$$

donde:

- $\sigma$  es la Resistencia a la compresión simple

| Compacidad | Grado compacidad | Resistencia | N (SPT) | $\varphi$ |
|------------|------------------|-------------|---------|-----------|
| Muy Suelta | <0.2             | <4          | < 0.20  | < 0.30    |
| Suelta     | 0.2-0.4          | 4-10        | 20-40   | 30-35     |
| Compacta   | 0.4-0.6          | 10-30       | 40-120  | 35-40     |
| Densa      | 0.6-0.8          | 30-50       | 120-200 | 40-45     |
| Muy Densa  | > 0.8            | > 50        | >200    | >45       |

Tabla 1. Tabla para el calculo de las propiedades dinámicas del terreno

| Consistencia (suelos cohesivos) | N. (SPT) | Resistencia a la compresión |
|---------------------------------|----------|-----------------------------|
| Muy Blanda                      | < 2      | < 0.25                      |
| Blanda                          | 2-4      | 0.25-0.50                   |
| Mediana                         | 4-8      | 0.5-1                       |
| Compacta                        | 8-15     | 1-2                         |
| Muy Compacta                    | 15-30    | 2-4                         |
| Dura                            | > 30     | >4                          |

Tabla 2. Tabla para el calculo de las propiedades dinámicas del terreno

#### Modificación al Número de Golpes

Cuando la penetración coincide con nivel freático es necesario modificar el número de golpes, ya que la presencia de agua puede alterar el resultado, para ello se usa la fórmula:

$$N = 15 + (1/2)(n - 15) \quad (5)$$

donde:

- $n$  es el número de golpes registrados bajo en nivel freático

### 3.5 PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO

Los métodos geofísicos hacen posible la investigación de las propiedades de los suelos, los sedimentos y los afloramientos rocosos, también son utilizados para determinar las propiedades dinámicas de los suelos, en particular los de compresión y cortante, velocidades de las ondas del suelo, así como los módulos de elasticidad y de corte del suelo. Estas propiedades son necesarias para determinar la respuesta del suelo y los sistemas suelo-estructura a cargas dinámicas. (J. David Velasquez, Junio 2014).

**Coefficiente de Poisson:** Es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo, dado por: (Universidad Jaume I, España).

$$\sigma = \frac{V_p^2 - 2}{2 \frac{V_p^2}{V_s^2} - 2} \quad (6)$$

**Capacidad Portante (qa):** Capacidad del terreno para soportar las cargas aplicadas sobre él. Técnicamente la capacidad portante es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el terreno tal que no se produzcan un fallo por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo. (Capacidad Portante de Suelos, 2014).

capacidad admisible (qa)

capacidad de carga última (qf)

$$nq_a = qf = \frac{V_s^2 \cdot 4}{1590} (kpa) \quad (7)$$

Donde  $n$ , es el factor de seguridad, y  $V_s$ , es la velocidad de onda  $S$ . Para la determinación del factor de seguridad  $n$ , se toma en la Tabla 1.

**Módulo de elasticidad o de Young (E):** Es la relación entre el esfuerzo y la deformación normal.

$$E = 2G(1 + \sigma) \quad (8)$$

La Tabla 4 muestra el rango aproximado de los parámetros elásticos para varios suelos.

| TIPO DE SUELO     | COEFICIENTE DE POISSON |
|-------------------|------------------------|
| ARENA SUELTA      | 0,20-0,40              |
| ARENA DENSA MEDIA | 0,25-0,40              |
| ARENA DENSA       | 0,30-0,45              |
| ARENA LIMOSA      | 0,20-0,40              |
| ARENA Y GRAVA     | 0,15-0,35              |
| ARCILLA MEDIA     | 0,20-0,50              |

**Tabla 3.** Parámetros elástico para varios suelos. Modificado de Das, B. 1999.

**Módulo de rigidez (G):** o módulo de cizalladura, es el cociente entre el esfuerzo transversal unitario y el desplazamiento relativo de los planos se define como:

$$G = \rho V_s^2 \quad (9)$$

**Densidad del terreno :** o peso unitario, es la relación de la cantidad de masa comprendido en un determinado volumen. Puede ser hallada en función de las velocidades de onda  $P$  y  $S$ :

$$\rho = \frac{G}{V_s^2} \quad (10)$$

Para el contenido de agua en el suelo, la relación se da por:

$$W = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad (11)$$

Donde:

- $W_w$  peso del agua
- $W_s$  peso del suelo seco

## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Método Sísmico de Refracción

Los resultados procesados en campo fueron los siguientes, teniendo en cuenta la velocidad de la onda registrados por el programa , que nos permiten visualizar la profundidad de los diferentes niveles estratigráficos presentes en escala de colores y medir su espesor:

#### Línea Paralela a la vía

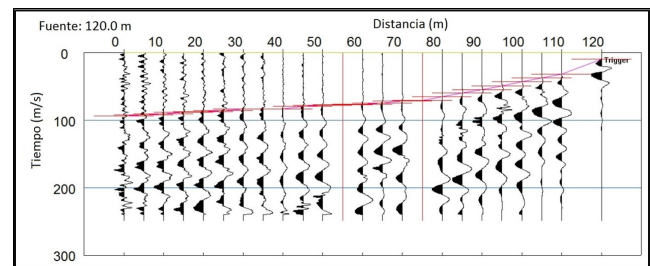
La primera línea, paralela a la vía, que comprende desde la superficie hasta los 3.83 m, en un primer nivel, se caracteriza por la presencia de materiales heterogéneos (arenas, arcillas) junto con otros de clara incidencia antrópica (material orgánico, plásticos, papel, entre otros). La calidad de estos materiales no es la más óptima para que soporte algún tipo de edificación debido a la composición del suelo, además del alto nivel freático presente en la zona, y la inclinación de terreno formando grandes pendientes.

El segundo nivel está conformado por materiales detríticos como gravas y arenas, así como un alto contenido en arcillas y limos. Este segundo nivel se ubica a una profundidad de 6 m desde la superficie hasta 11.23 m de profundidad según el sondeo.

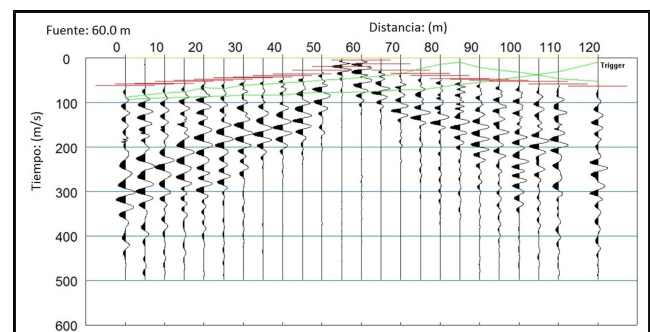
Un tercer nivel, localizado por debajo del nivel anterior, consiste en arenas y arcillas saturadas, presentando una alta consistencia. (FIGURA 20).

| ADQUISICIÓN DE DATOS                   |             |             |       |
|--|-------------|-------------|-------|
| DESCRIPCIÓN                            | LINEA 1     | LINEA 2     | MAS W |
| COOR. INICIALES<br>(Longitud, Punto 0) | 72.646069 N | 72.645927 N | —     |
| COOR. FINALES<br>(Latitud, Punto 120)  | 7.386753 E  | 7.386171 E  | —     |
| LONGITUD (m)                           | 120         | 120         | 23    |
| PRIMER<br>OFFSET (m)                   | 10          | 10          | 0,5   |
| SEPARACIÓN (m)                         | 5           | 5           | 1     |
| DE RECEPTORES<br>INTERVALO             | 0,25        | 0,25        | 0,25  |
| DE MUESTREO (ms)                       |             |             |       |
| TIEMPO DE<br>REGISTRO (ms)             | 250         | 250         | 250   |
| No. DISPAROS                           | 5           | 5           | 1     |
| No. GOLPES                             | 10          | 5           | 10    |
| N. GEÓFONOS                            | 24          | 24          | 24    |

**Tabla 4.** Información empleada en el método de Refracción Sísmica



**FIGURA 12.** Picado con Pickwin en el inicio de la línea paralela a la vía.



**FIGURA 13.** Picado con Pickwin en el centro de la línea paralela a la vía.



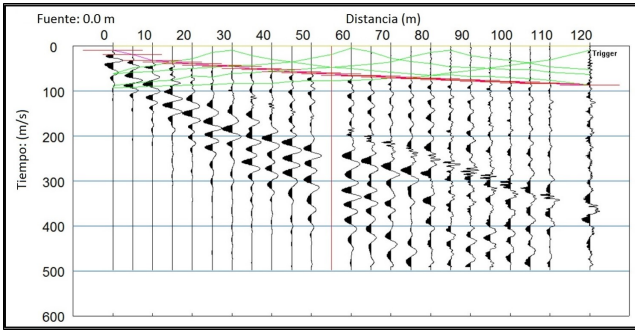


FIGURA 14. Picado con Pickwin al final de la línea paralela a la vía.

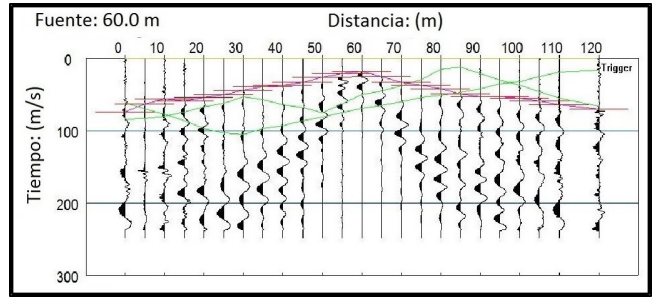


FIGURA 17. Picado con Pickwin en el centro de la línea perpendicular a la vía.

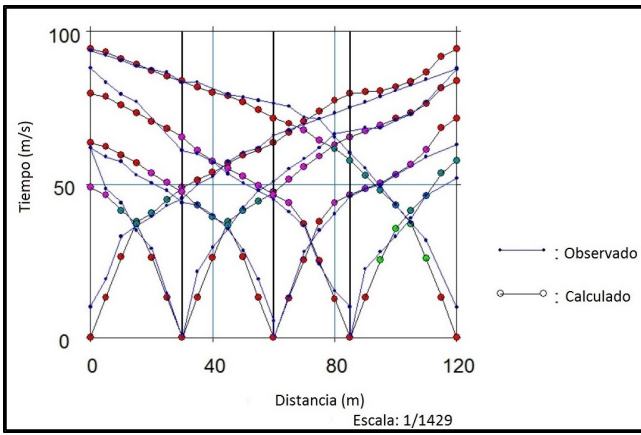


FIGURA 15. Curva de tiempos observados y calculados.

*Línea Perpendicular a la vía*

La segunda línea, comprende desde la superficie hasta una profundidad aproximada de 3.80m en la parte más alta, prosigue desde la superficie hasta una profundidad de 1.20m en el centro de la línea hasta el final en un primer nivel, se caracteriza por la presencia de rocas en proceso de meteorización además de un alto nivel de arcillas.

En un segundo nivel, consiste en materiales detríticos como gravas y arcillas saturadas. Este segundo nivel se sitúa desde los 8.50 m de profundidad desde la superficie hasta 10.0 m de acuerdo al sondeo.

Un tercer nivel, localizado por debajo del nivel anterior, consiste en areniscas y roca erosionada en una pequeña cantidad. (FIGURA 21).

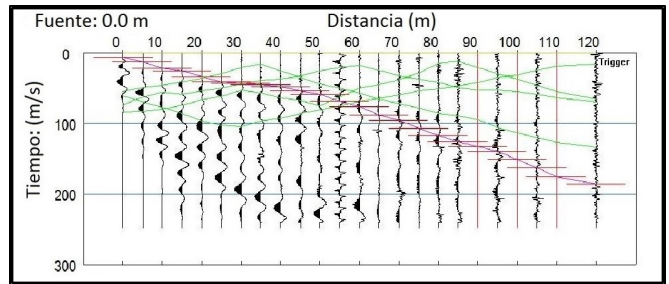


FIGURA 18. Picado con Pickwin al final de la línea perpendicular a la vía.

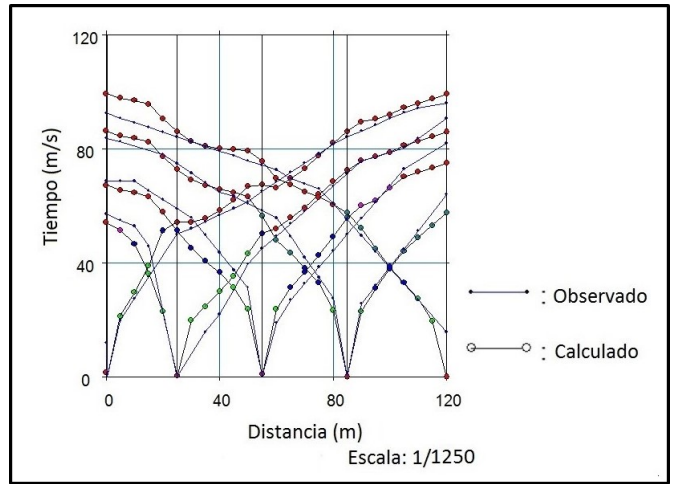


FIGURA 19. Curva de tiempos observados y calculados.

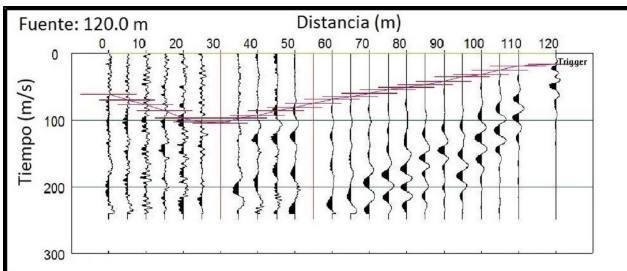


FIGURA 16. Picado con Pickwin al inicio de la línea perpendicular a la vía.

| LÍNEA | ERROR (ms) | RMSE (ms) | AVERAGE RMSE (ms) |
|-------|------------|-----------|-------------------|
| 1     | 0.93       | 4.37      | 3.72              |
| 2     | 1.23       | 4.68      | 3.98              |

Tabla 5. Datos adquiridos del procesamiento por el método refracción sísmica

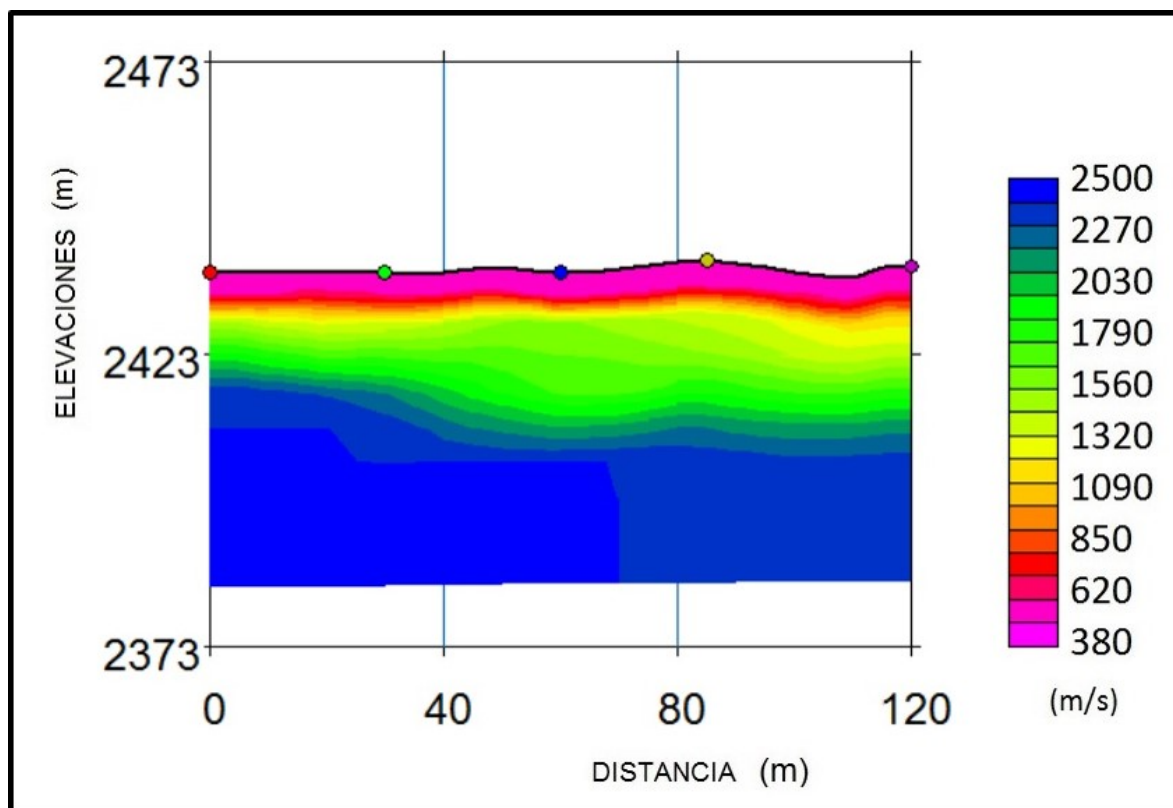


FIGURA 20. Inversión del modelo inicial, línea paralela a la vía.

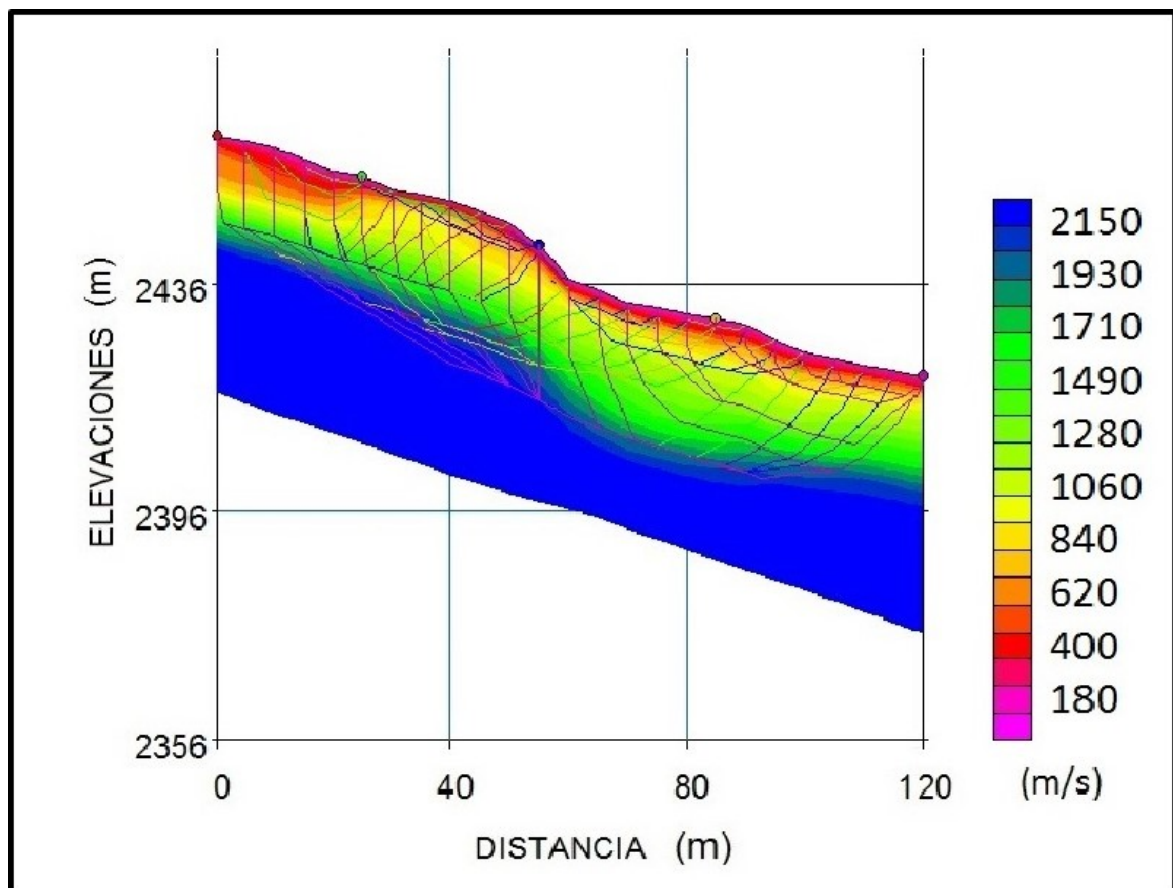


FIGURA 21. Inversión del modelo inicial, línea perpendicular a la vía.

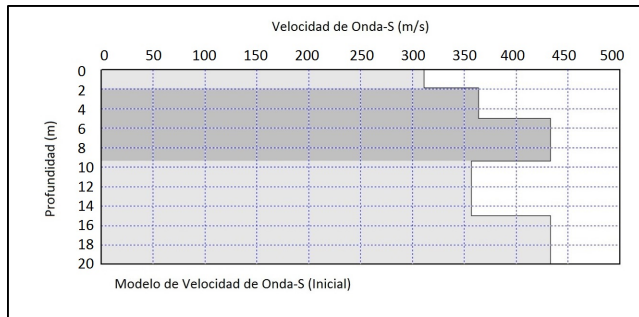
**Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, MASW**

Los resultados procesados nos muestran que existen tres capas con espesores de 0 a 2 m la primera capa, de 2 m a 5.50 m la segunda capa, de 5.50 m a 10.10 m y la última capa con una profundidad aproximada de 22 metros.

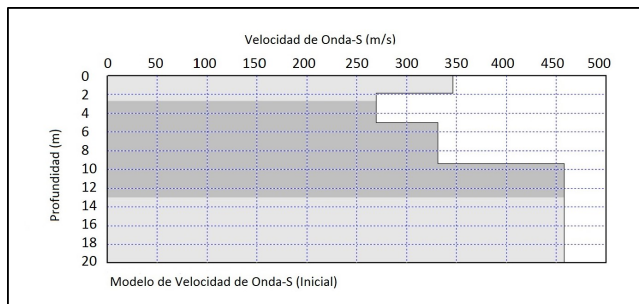
Las velocidades de onda S de dichas capas son entre 280 m/s a 350 m/s, para la capa superficial que de acuerdo a sus velocidades la clasificaría dentro de arenas, arcillas y materiales orgánicos (vegetación, papeles, plásticos). Pasando a la siguiente capa que tiene velocidades que oscilan ente 280 m/s a 330 m/s, Se caracteriza por materiales que podrían estar asociados arcillas y limos. Prosiguiendo encontramos velocidades entre 330 m/s a 460 m/s, ubicándola dentro de arenas y arcillas saturadas. (FIGURAS 22-23).

| DESCRIPCIÓN         | LÍNEA 1                        |                                    | LÍNEA 2                        |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| MÉTODO              | Refracción sísmica             | MASW (1 por cada lado de la línea) | Refracción sísmica             |
| LONGITUD            | 120 m                          | 23 m                               | 120 m                          |
| SEPARACIÓN GEÓFONOS | a 10 m, los siguientes cada 5m | a 50 cm, los siguientes cada metro | a 10 m, los siguientes cada 5m |
| NUMERO GEÓFONOS     | 24                             | 24                                 | 24                             |

**Tabla 6.** Adquisición de Datos y métodos empleados en las respectivas líneas intervenidas



**FIGURA 22.** MASW al inicio de la línea paralela a la vía.



**FIGURA 23.** MASW al final de la línea paralela a la vía.

**Tomografía de Resistividad Eléctrica**

|                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| ELECTRODOS         | 41                   |
| CABLE              | 2 Cables (400m)      |
| CONECTORES         | 82                   |
| ORDENADOR PORTÁTIL | 1                    |
| UNIDAD CENTRAL     | 1 Terraneter Ls ABE, |

**Tabla 7.** Materiales Utilizados en el Método de Refracción Sísmica

*Línea Paralela a la vía*

En general se observa un alto rango de los valores de las resistividades del subsuelo que va desde los 11.9 ohm hasta los 2207 ohm.m. Con el uso de herramientas simples de dibujo se estimó un aproximado de los espesores de capa, para conseguir un análisis más detallado de la tomografía, de esta manera se obtuvo; que se encuentra dividido en aproximadamente cuatro capas con espesores respectivos de dos (2) metros, seis (6) metros, ocho (8) metros y la última capa alcanza una profundidad de exploración aproximadamente los 24 metros, teniendo en cuenta que el modelo de exploración fue el Gradiente cuyo rango de profundidad oscila entre el 19% al 22% de longitud de exploración, se evidencia que efectivamente la tomografía cumplió con lo esperado para la profundidad analizada. (FIGURA 24).

Por otra parte los tonos verdes, predominante en cada uno de los niveles de la Imagen de Resistividad Eléctrica, posee una resistividad aparente que oscila entre 111 y 235 Ohm, por el tipo de formación geológica corresponde a gravas y arenas saturadas, posterior a ello los tonos azules en NIVEL III (c y d) de la tomografía, hace visible la presencia de estratos de suelo con resistividades aparentemente bajas entre los 52 y 100 Ohm, que están asociados a arcillas saturadas, por último se acreditan tramos de suelo que rompen el entorno y llaman la atención por la diferencia tan alta con respecto al tipo de suelo predominante, estos muestran resistividades altas que van de los 1646 Ohm hasta los 2220 Ohm (NIVEL II, a y b), que de acuerdo a las formaciones rocosas que se aprecian en la superficie del terreno, obedecer a bloques de suelo duro o profundización de las rocas superficiales. (FIGURA 26)

*Línea Perpendicular a la vía*

Con el uso de herramientas de dibujo, se estimó un análisis más detallado de la tomografía, en la cual se obtuvo, que se encuentra en tres capas con espesores respectivos de tres (3) metros, seis (6) metros y la última capa alcanza una profundidad de exploración de 22 metros aproximadamente. (FIGURA 25).

Los tonos verdes, predominante en el Nivel II, posee una resistividad aparente que oscila entre los 60 y 150 Ohm.m la cual pertenece a gravas y arenas saturadas. Los tonos azules en el Nivel I (b) y Nivel II (a) de la tomografía muestra la presencia de estratos asociado a arcillas saturadas, puesto que la resistividad oscila entre los 10 y 30 Ohm.m, el tono amarillo en el Nivel I estaría asociado a limos y arcillas ya que presenta resistividades aparentes de 180 ohm.

En el Nivel II (c) en donde la resistividad oscila entre los 500 y 700 Ohm.m se puede presentar formaciones de rocas en proceso de meteorización y suelos rocosos duros. (FIGURA 27).



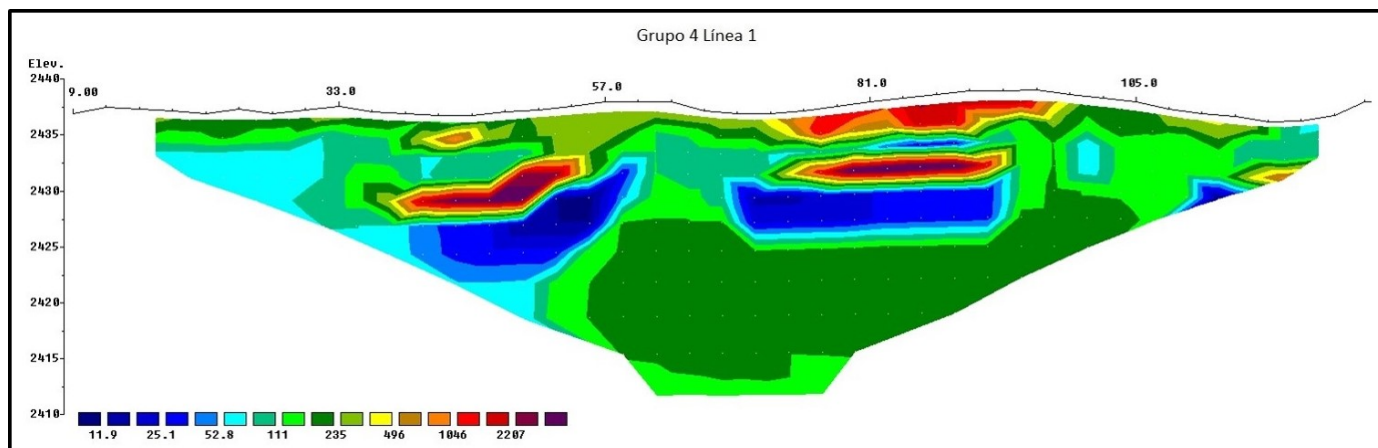


FIGURA 24. TRE, línea paralela a la vía, datos crudos.

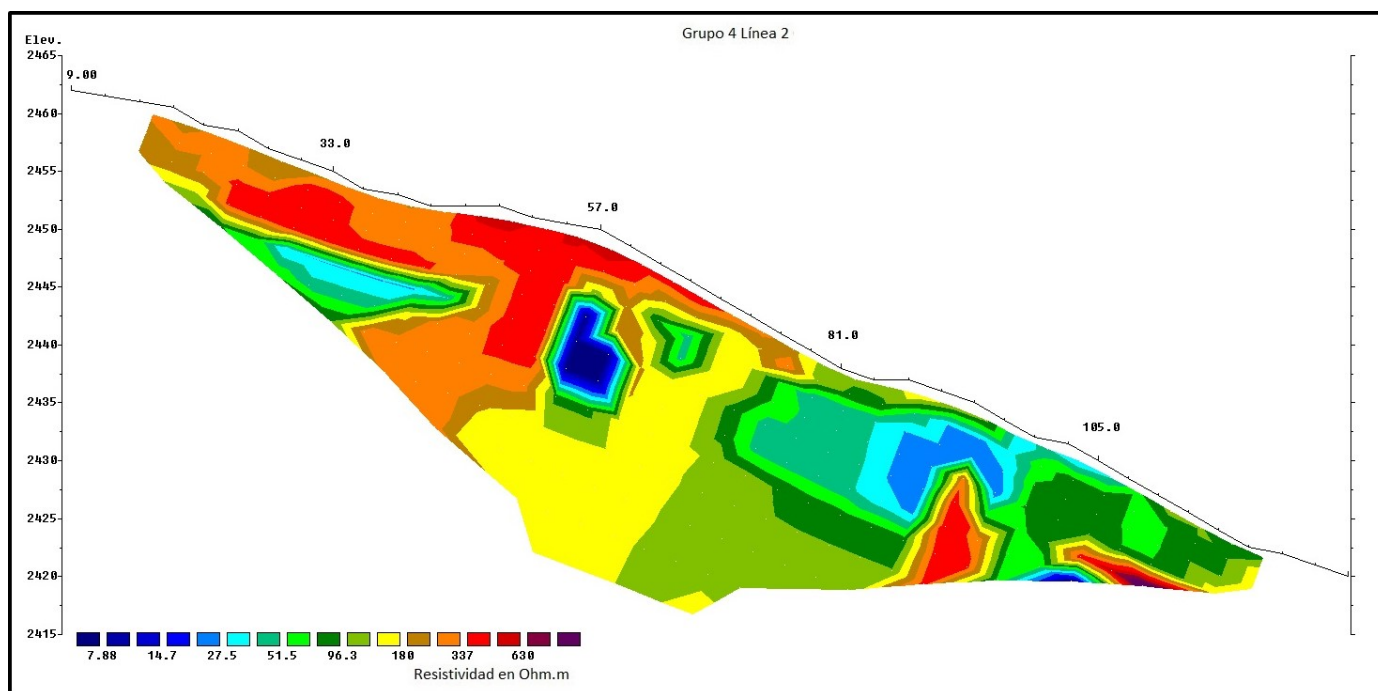


FIGURA 25. TRE, línea perpendicular a la vía, datos crudos.

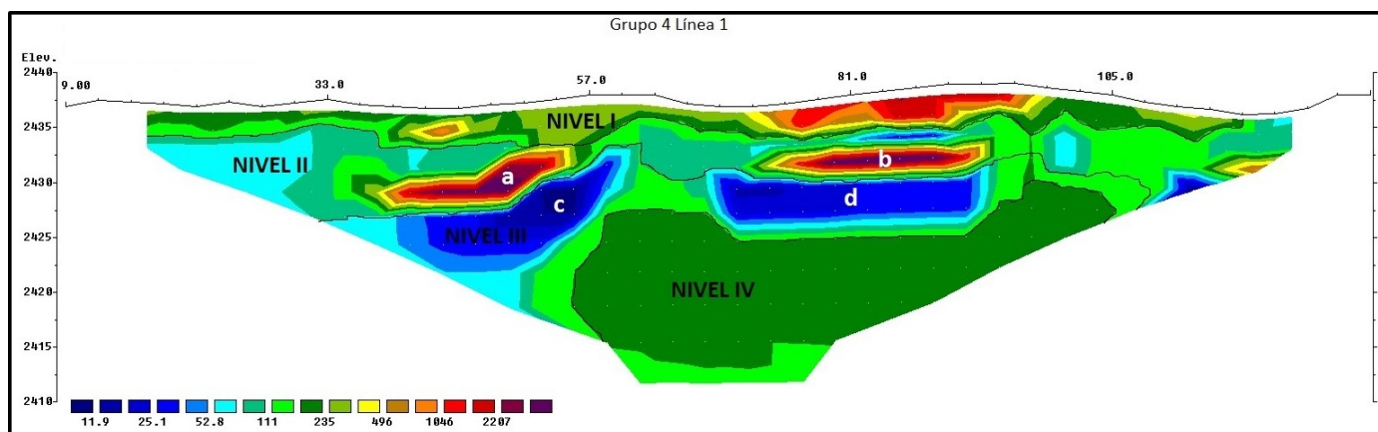


FIGURA 26. TRE, línea paralela a la vía, datos modificados.

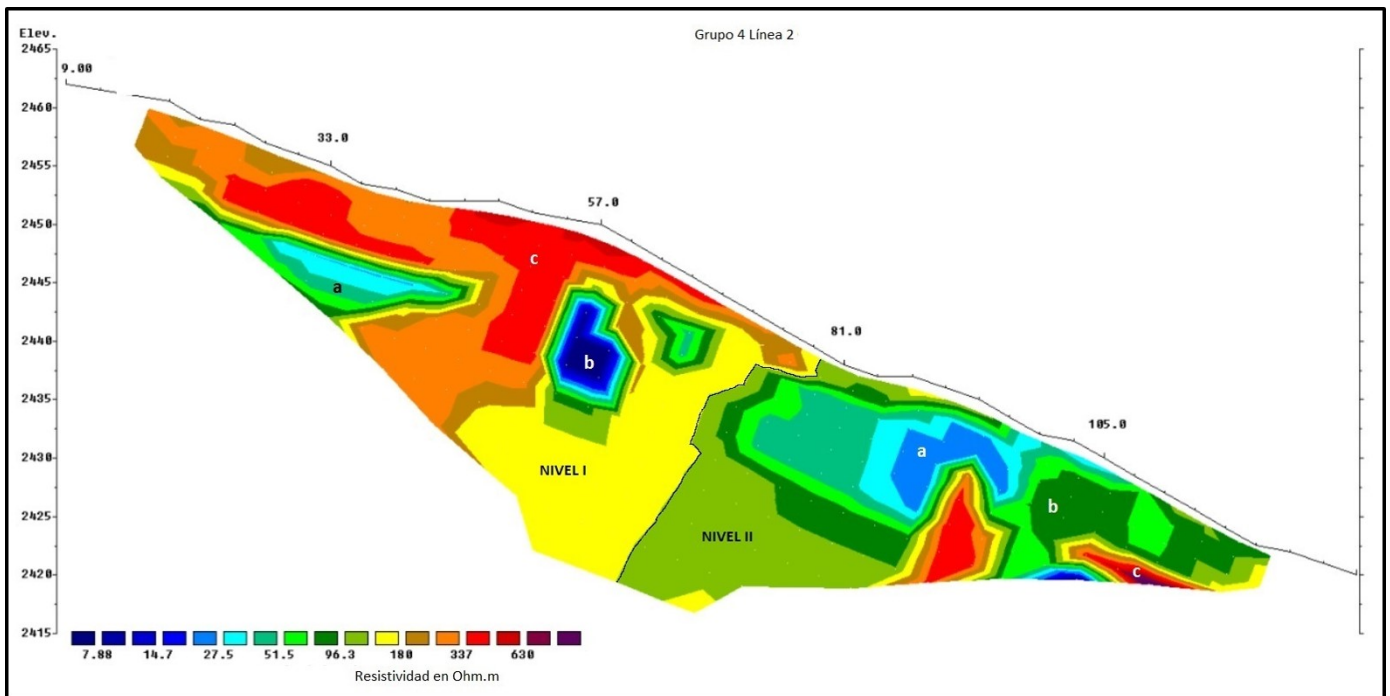


FIGURA 27. TRE, línea perpendicular a la vía, datos modificados

**Ensayo de Penetración Estándar (SPT)**

Para todos los estratos se evidencio la existencia de suelos cohesivos con contenido de humedad por lo que fue necesario, para los estratos 2 y 4 modificar el número de golpes en vista de la presencia de nivel freático.

La resistencia de penetración, densidad admisible y resistencia a la compresión simple varían dependiendo al estrato y se muestran variables debido a que el número de golpes muestra un comportamiento variable, producto de las locas metamórficas incrustadas en la zona de exploración.

Los laboratorios de humedad y densidad realizados a las muestras, se evidencia el alto grado de saturación de los materiales, especialmente en la capa superficial del terreno ya que se encuentra compuesta por material orgánico y vegetal. Al realizar la clasificación del suelo encontramos que está conformado por arcillas, arenas, limos, saturados y grabas en meteorización.

| Profundidad |       | Golpes |      |      |      |      | Total Golpes |
|-------------|-------|--------|------|------|------|------|--------------|
| Desde       | Hasta | 6"     | 12"  | 18"  | 21"  |      |              |
| 0           | 0.5   | 1      | 0.5  | 0.5  | 1    | 3    |              |
| 0.5         | 1     | 8.5    | 8    | 8    | 10.5 | 35   |              |
| 1           | 2     | 6      | 7    | 11   | 19   | 43   |              |
| 2           | 3     | 12     | 17   | 16   | 17   | 62   |              |
| 3           | 4     | 9.5    | 11.5 | 12.5 | 14.5 | 48   |              |
| 4           | 4.5   | 10     | 26   | 17   | 7.5  | 60.5 |              |

Tabla 8. Adquisición de datos del ensayo SPT

| Profundidad |       | Propiedades del suelo |     |        |                |  |
|-------------|-------|-----------------------|-----|--------|----------------|--|
| Desde       | Hasta | N                     | Rp  | Padm   | $\sigma_{adm}$ |  |
| 0           | 0.5   | 3                     | 12  | 0.375  | 0.375          |  |
| 0.5         | 1     | 35                    | 140 | 4.375  | 4.375          |  |
| 1           | 2     | 43                    | 172 | 5.375  | 5.375          |  |
| 2           | 3     | 62                    | 248 | 7.75   | 7.75           |  |
| 3           | 4     | 48                    | 192 | 6      | 6              |  |
| 4           | 4.5   | 60.5                  | 242 | 7.2625 | 7.2625         |  |

Tabla 9. Resultados obtenidos del ensayo SPT

**Ensayo de Humedad**

| (#) muestra | Peso R/te (gr) | Peso Muestra W + R/te | Peso Muestra Húmeda | Muestra Seca + R/te | Muestra seca | (%) W |
|-------------|----------------|-----------------------|---------------------|---------------------|--------------|-------|
| 1           | 4.3            | 65.9                  | 61.6                | 38.9                | 34.6         | 43.83 |
| 2           | 4.1            | 307.3                 | 303.2               | 230.1               | 226          | 25.46 |
| 3           | 7.4            | 1359                  | 1351.6              | 834.1               | 826.7        | 38.83 |
| 4           | 7.4            | 750.7                 | 743.3               | 589.2               | 581.2        | 21.72 |
| 5           | 7.4            | 979.9                 | 972.5               | 735.7               | 728.3        | 25.11 |

Tabla 10. Resultados de laboratorio de la Humedad del terreno

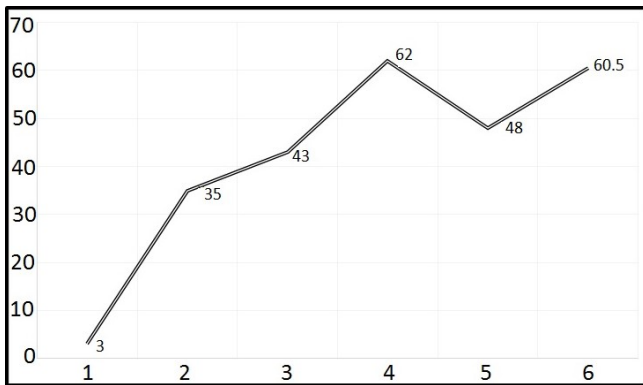
donde:

- R/te = Recipiente
- W= Humedad

**Ensayo de Parafina**

| altura de la Muestra (m) | Radio (m) | Volumen de la Muestra | $\rho$<br>$\rho=m/v$ | $\rho$<br>Seca | Diferencia de $\rho$ |
|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------------|----------------|----------------------|
| 0.04                     | 0.01905   | 4.56 E -05            | 592056               | 592056         | 0.3                  |
| 0.03                     | 0.01905   | 3.42 E -05            | 906357               | 906357         | 0.3                  |
| 0.05                     | 0.01905   | 5.70 E -05            | 1559519              | 1559519        | 0.9                  |
| 0.06                     | 0.01905   | 6.48 E -05            | 11899959             | 1189959        | 0.8                  |
| 0.04                     | 0.01905   | 4.56 E -05            | 1436284              | 1436284        | 0.7                  |

**Tabla 11.** Resultados de laboratorio, ensayo Parafina



**FIGURA 28.** Gráfico de profundidad Vs golpes.

**5 ANÁLISIS GENERAL**

Las técnicas de prospección geofísica, el ensayo de penetración estándar y los laboratorios de densidad y humedad aparentes, nos permiten tener un amplio espectro de la zona de estudio, demostrando así que cada uno posee sus limitaciones y alcances; pero que nos ofrecen una descripción y explicación de la composición física, estructural y estratificación del suelo, sus deformaciones he inconsistencias por fenómenos biológicos, mecánicos y físicos que los alteran.

Dichas técnicas clasifican y muestran similitudes en la clasificación del suelo, dándonos a conocer que está formado por arcillas, arenas, limos, todos saturados por el afloramiento de aguas que llevan a niveles freáticos altos, que la inclinación del terreno provee altas pendientes que hace que tienda a deslizarse, formando grandes desniveles, deformaciones, desfases y grietas con los planos de falla, las fallas aguardiente y túb- Mercedes y la meteorización del mismo.

**6 AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos al grupo de investigación PANGEA de la Universidad de Pamplona, Norte de Santander, por la formación y el prestamos de los implementos necesarios para la adquisición de los datos en el desarrollo de esta investigación. Al Director de Programa de la Facultad de Ingeniería Civil el Ingeniero Manuel Contreras y al docente Juan Camilo Gomez

Geologo de la Universidad Industrial de Santander (UIS) por los acompañamientos en las labores de campo y al evaluador del presente trabajo, el Especialista Jairo Alberto Torres, cuyas valiosas observaciones contribuyeron en la mejora de este artículo.

**7 CONCLUSIONES**

Al realizar el método sísmico de refracción se observó que el procedimiento es similar al del análisis multicanal de ondas (MASW), a diferencia de las distancias entre los sensores y la forma de medición de la onda.

La capacidad portante del suelo su composición, estructura demuestra que no es un terreno acto para la construcción.

El nivel freático del suelo es alto debido al afloramiento de aguas tanto superficiales como subterráneas, que con la tomografía de resistividad eléctrica mostro la posibles formaciones de acuíferos o depósitos de la misma.

Con las técnicas de prospección geofísica fue posible establecer cualitativamente las fallas, deformaciones, fisuras y agrietamiento del terreno.

Los métodos de prospección geofísica son no invasivos permitiéndonos estudiar el suelo, conservándolo en su estado natural aunque con algunos alcances y limitaciones.

La presencia de nivel freáticos alto, la composición del suelo de arcillas y limos, las fallas presentes en él y la inclinación, causan deslizamientos superficiales y subterráneos que lo deterioran. Haciendo evidente la pronta intervención para evitar posibles catástrofes.

El estudio realizado ha permitido evaluar las limitaciones de los diferentes métodos empleados en la caracterización del subsuelo y sus ventajas.

**8 REFERENCIAS**

Encisas Franco Enrique, 2005. Análisis Multicanal de Ondas Superficiales MASW, Geotécnia y Geofísica, Georgys Ingenieros S.A.C.

Perez M, 2013. Aplicación de Tomografía de Refracción Sísmica, Tesis de grado.

Secretaria de Planeación e Infraestructura, 2015. Plan Básico de Ordenamiento Territorial, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Camacho Navas Orlando, 2012. Anatomía geológica de Colombia.

Rubina F, 2003, Métodos Geofísicos. <http://es.slideshare.net/FRANKFLORESRUBINA/prospeccion-geofisica-metodos>.

GEORYS INGENIEROS S.A.C. Marzo, 2016 Análisis Multicanal de Ondas Superficiales – MASW.

Cruz L, 2014, Geotecnia. [ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Geotecnia/profesor lucio cruz](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Geotecnia/profesor%20lucio%20cruz).

Diaz Gullermo, 2007, Tomografía Eléctrica.



<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/07.pdf>

Velasques Juan David, Junio 2014. Determinación de las propiedades geofísicas del suelo.

Universidad de España Jaume I, 2009. Enciclopedia virtual de Ingeniería mecánica.

Cepedes J, 2015, Tomografía de Resistividad Eléctrica. [https://www.ecured.cu/Tomografía de Resistividad Eléctrica.](https://www.ecured.cu/Tomografía%20de%20Resistividad%20Eléctrica)

Kairope 2014. Capacidad portante de suelos.

Das Braja M, 1985. Fundamentos de ingeniería geotécnica

Ramirez Hoyo Leon, Posada Gustavo, Noriega Santiago, Monsalve Gaspar, 2016. Tomografía de resistividad eléctrica aplicada ala análisis de fallas activas. Caso de estudio: Falla de Abriquí, Frontino, Antioquia.

Telles Julia, 2006. Análisis e Interpretación de Ondas P y S de perfiles sísmicos, Universidad de Madrid.

Nuñes mayhuasca Miguel, ensayo de penetración estándar, Standard Penetration Test ASTM, 2010, UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ.

Romero García Carlos unidades tecnológicas de Zacatenco, Mexico, OCT 2013, prueba de penetración estándar.

SeisImager/SW, Manual, 2009, Versión 3.0, Pickwin v.4.0.1.5 WaveEq v.2.3.0.8 GeoPlot v.8.4.1.3.

SeisImager/2D, Manual, 2009, Versión 3.3, Pickwin v.4.0.1.5 Plotrefa v.2.9.1.6 GeoPlot Geometrics.