

APLICACIÓN DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA EN UNA LADERA DE JUAN XXIII EN LA CIUDAD DE PAMPLONA (Norte de Santander, Colombia)

Y.P. Montes¹, J.O. Unda¹, K.M. Casas¹, J.A. Torres², D.A. Gutierrez³, M.A. Contreras¹, J.C. Gomez⁴

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

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

³ Grupo de Investigación en Geofísica y Ciencias de la Computación (GGC3), Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Antioquia, Colombia

⁴ Hydroingeniería, Bucaramanga, Santander, Colombia

RESUMEN

La ciudad de Pamplona se caracteriza por ser una zona de alta sismicidad y relieve montañoso, su casco rural se distingue por altas pendientes y laderas, este trabajo está enfocado en una de ellas ubicada en cercanías del barrio Juan XXIII, el cual utiliza la geofísica y geotecnia como herramienta para estratificar el suelo y así conocer los tipos de materiales existentes. A partir de los métodos de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) se obtuvo las velocidades de las ondas P y S para determinar el número de capas existentes con sus espesores y parámetros dinámicos que aporta el suelo como módulo de Young, módulo de Poisson, densidad del terreno, capacidad portante entre otros. también se utilizó la tomografía de resistividad eléctrica mediante el método gradiente el cual permite ver el comportamiento eléctrico del subsuelo a una profundidad determinada, donde se realizaron sondeos verticales con el fin de identificar los tipos de rocas y sedimentos presentes a partir de la resistividad de los materiales, finalmente se realizó una última práctica de ensayo de penetración estándar (SPT) para obtener muestras representativas del suelo y estudiarlas en el laboratorio y verificar la información y características obtenidas en el terreno, partiendo de los datos anteriores se crearon perfiles geológicos los cuales se correlacionaron con los diferentes métodos y se compararon con la geología existente de la zona para tener absoluta certeza de la caracterización del subsuelo.

Key words: Sismicidad, geofísica, tomografías, gradiente.

RESUMEN

The city of Pamplona is characterized for being a high seismicity zone and mountainous, its rural area stands out for high slopes and hillsides. This work is focused on one of the hillsides that is located close to Juan XXIII neighborhood in which we have employed the geophysics and the geotecny as a work tool to characterize and to stratify the soil and thus to be able to know the type of materials existing in that hillside. Two lines of study were carry out, one of them was parallel to the Pamplona-Bucaramanga road and the other was perpendicular to it. From seismic refraction methods and multichannel surface wave analysis (MASW) the velocity of waves P and S were obtained to determine the number of existing strata, thicknesses and dynamic parameters that the soil provides (Young's Modulus, Poisson's Ratio, soil density, bearing capacity, etc.). Moreover, the electrical resistivity tomography was used through the gradient method which allowed us to regard the electrical behavior of the subsoil in one single depth along the profile, we did vertical explorations with the purpose of identifying the sort of rocks and sediment presents from the resistivity of the materials. Finally, a standard penetration test was (SPT) used to obtain representative samples from the soil and thus to be able to study them in the laboratory then, to verify the data and features collected from the soil. Based on the previous data, geological profiles were created which were correlated with different methods and compared with the existing geology of the zone to have absolute certainty of the subsoil characterization.

Key words: Seismicity, geophysics, tomography's, gradient.

1 INTRODUCCIÓN

La sismicidad en Colombia está relacionada en gran parte con los movimientos relativos de las placas Nazca, Caribe y Suramericana; se supone que el límite de la placa del Caribe penetra a territorio venezolano a través de la falla de Boconó, hasta encontrar la red poligonal de fallas de la cordillera Oriental (fallas de Bucaramanga, Aguardiente, Chitagá, Cucutilla, Tasajero, Gramalote, Mutiscua y Pamplona, entre otras).

El departamento de Norte de Santander hace parte de la frontera de riesgo sísmico alto, integrada por tres micro-regiones: Norte de Santander, Santander y norte de Boyacá y Noreste de Venezuela. Presenta una tectónica regional especial, en la que la orientación de los ríos Chicamocha y Sogamoso define una zona importante de la cordillera Oriental, con dirección general SSW-NNE; de ésta se rompe bruscamente a $6^{\circ} 5'$ Lat. N y $72^{\circ} 27'$ longitud W, para virar hacia el NNW, donde comienza la falla sísmica de los Santanderes, excesivamente fracturada en todas direcciones. Sobresalen las fallas de Lourdes, Mercedes; Tasajero y Aguardiente. (Rodríguez y Cantillo, 2006).

Ubicada en el departamento de Norte de Santander, la ciudad de Pamplona cuenta con un déficit en la caracterización de las fallas activas existentes a escala local aun cuando se sabe que su relieve se caracteriza por zonas montañosas tropicales muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierras debido a que se reúnen cuatro elementos importantes para su ocurrencia tales como son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas. Los factores que se presentan en la ciudad de Pamplona desde el punto de vista geológico tienen diversos orígenes, dentro de los cuales podemos nombrar como principales el tectonismo y las pendientes que oscilan entre moderadas y altas. (Alvarez, Lázaro *et al.*, 2004).

En particular, este trabajo se concentra en el barrio Juan XXIII, ubicado en el municipio de Pamplona, donde se estudió el terreno bajo la aplicación de técnicas de exploración como Refracción Sísmica, MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) y (TRE) (2D) Tomografía de Resistividad Eléctrica que son utilizados en el estudio del subsuelo. Posterior a estos métodos se aplica el ensayo de penetración estándar SPT (Standard Penetration Test), con la finalidad de verificar la información y características obtenidas del terreno presente en la zona, utilizando ensayos de laboratorios de suelos.

El método de refracción sísmico constituye una herramienta de apoyo de suma importancia en el estudio de la constitución interna de la Tierra. Este método ha sido utilizado para la prospección petrolera y minera, así como en la geotecnia, cuando se requiere determinar la configuración rocosa del subsuelo en un área de interés. Los resultados de la sísmica de refracción han aportado significativamente en la generación de una imagen sobre la estructura interna terrestre. (Bunch, 1980; Jarchow y Thompson, 1989 y Jacoby *et al.*, 2007).

Este método se basa en el tiempo de propagación de las ondas elásticas en el terreno, las cuales son generadas en la superficie y transmitidas en el subsuelo, al incidir en un límite a través del cual hay un contraste en la velocidad, entonces se genera un cambio en la dirección del desplazamiento de la onda, este hace que estas ondas sean refractadas y lleguen a un punto en

la superficie donde son captadas por los receptores (geófonos). Este método tiene como característica la obtención de perfiles del subsuelo horizontalmente más largos. (Gutiérrez y Buitrago, 2016).

Por otra parte la (TRE) (2D), comúnmente encontrado en la bibliografía como ERT, abreviación de Electrical Resistivity Tomography o Electrical Imaging (Dahlin, 2001), es un método que permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo lateralmente y en dirección de la profundidad. Se estudia a lo largo de líneas en una dirección determinada, donde se inyecta corriente eléctrica y mediante un receptor se observa la respuesta del subsuelo, siendo el resultado, datos de resistividades aparentes. Se caracteriza por ser una técnica de resistividad multielectrónica, cuyo arreglo geométrico varía dependiendo del objetivo de estudio. Con las mediciones adquiridas se construye una sección en dos dimensiones (2D) que muestra una primera aproximación de los cambios de la resistividad eléctrica en el subsuelo. Posteriormente, se aplica un algoritmo de inversión para obtener la distribución real de resistividades o imagen eléctrica. Imagen que será un resultado interpretable desde un punto de vista físico y geológico, y que dará información sobre las características físicas del subsuelo. (Lara, 2012).

EL ensayo de penetración estándar, es un tipo de prueba de penetración dinámica, que es empleado para realizar ensayos en terrenos que se requiere realizar un reconocimiento geotécnico. Las pruebas de campo adquieren una gran importancia en los suelos muy susceptibles a la perturbación y cuando las condiciones del terreno varían en sentido horizontal y vertical. (Carmona, 2014).

2 MARCO GEOLÓGICO

La geología del área de estudio está constituida por unidades geológicas de edad devónica a cuaternaria. Rocas metamórficas de alto y medio grado, pertenecientes al ortoneis, representan parte del basamento metamórfico del macizo de Santander que aflora en el área. Sobre este basamento metamórfico descansan discordantemente rocas sedimentarias del cretáceo correspondiente a las formaciones Tibu-Mercedes y Aguardiente, perteneciente al grupo Uribante.

La zona objeto de estudio ha sido afectada por eventos tectónicos que han generado intenso fracturamiento, plegamiento y en general grandes deformaciones. En el flanco oriental del macizo de Santander, fallas generalmente de dirección N-S se extienden desde el borde norte del cuadrángulo H-13 en las áreas de Pamplona y Mutiscua hacia el sur, hasta el área de Soata (Ward *et al.*, 1973); de acuerdo con estos autores, la mayoría de estos rasgos tectónicos parecen ser normales, algunos con grandes desplazamientos que ponen en contacto rocas de Paleozoico Inferior o del Precámbrico con rocas del Terciario. (Rodríguez y Cantillo, 2006).

Formación Ortoneis: son rocas metamórficas que se encuentran muy meteorizadas y en contacto fallado con rocas Cretácicas de las Formaciones Tibú Mercedes y Capacho. Estas forman suelos residuales arcillo limosos a arenolimosos, dado que presentan zonación en bandas esquistosas y bandas cuarzo feldespáticas que al alterarse facilitan la evolución hacia los suelos mencionados.

Se localizan en los Barrios Santa Marta, El Buque, Juan Amado, Los Treces, Los Tanques. Granito de Durania: rocas ígneas intrusivas con alto contenido de cuarzo, feldespato, micas blancas y localmente turmalina. Se encuentran sectores con pegmatitas y muy meteorizado, generando suelos arenos limosos arenos arcillosos. Se encuentran en la parte alta de las Quebradas Cariongo, Monteadentro y Cepeda. Formación Capacho, rocas sedimentarias conformadas por intercalaciones de lodolitas negras (lutitas), calizas masivas y fosilíferas. Se describen en la parte media de la Quebrada Navarro y en la media de la quebrada Brighton.

Formación Aguardiente: Roca sedimentaria conformada por areniscas de grano medio a grano grueso, cuarzosas a cuarzo feldespáticas, colores crema a amarillento, de cementación variable, lo que las hace explotables para arena de peña y gravas. Se encuentra en la Cuchilla del Escorial, Cristo Rey, parte media de la Quebrada Navarro y en la vía a Bucaramanga. Localmente se encuentra brechada por acción de fallas, lo que en la vía a Bucaramanga facilita la caída de bloques de gran tamaño.

Formación Tibú Mercedes: roca sedimentaria conformada por un miembro arenoso inferior, Formación Tibú, y un miembro calcáreo, Formación Mercedes. Sin embargo, en este sector no se tiene bien diferenciado el contacto entre ambas, por lo que se cartografía como una sola unidad. Se encuentra en el Barrio Juan XXIII, parte alta de la Universidad, carretera a Cúcuta, parte alta del barrio San Pedro y vía a Bucaramanga.

Depósitos Cuaternarios: Son materiales recientes que se han depositado por caída en la base de las laderas, a los cuales llamaremos depósitos de coluvión de derrubio; y los depósitos de arrastre aluvial, los cuales se ubican en las partes con pendientes bajas a muy bajas. Los coluviones los podemos encontrar formando la ladera oriental de río Chiquito, Universidad de Pamplona al canal del río Pamplonita. (Delgado, 2011).

2.1 Marco tectónico

Estructuralmente el casco urbano de Pamplona se encuentra enmarcado en una zona de tectónica compresiva generada en la evolución de la cordillera Oriental, lo que produce estructuras con dirección norte-sur que afecta las diferentes litologías presentes.

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 Cristo Rey, generando un alto fracturamiento del macizo rocoso que puede heredar planos de falla a los depósitos cuaternarios de la zona de influencia. En la Cuchilla y el Escorial La formación Aguardiente presenta un sistema de fallas de contacto y normal que afecta a la parte media de la cuenca de la quebrada El Escorial, donde actualmente se desarrollan proyectos urbanísticos, que ameritan ser estudiados.

La fuerte tectónica afecta los macizos rocosos de la Unidad Ortoneis Produciendo fuerte fracturamiento que acelera los procesos de Meteorización. Sobre los depósitos cuaternarios no se observan Evidencias de Neotectónica, que suministren información sobre fallas en el basamento y hayan sido heredadas por los depósitos (POT, 2002).

2.2 Falla de Pamplona

La falla de Pamplona se extiende desde el norte, y al oeste del municipio de Pamplona, continua con dirección sur a sur-suroeste, hasta terminar en la falla de Morro Negro (Figura 1). A lo largo del trazo de esta falla, rocas metamórficas de la formación ortoneis en el bloque oriental están en contacto con una faja delgada de rocas sedimentarias del cretáceo en el bloque occidental. Hacia el sur de Pamplona, esta falla corta al Granito de Durania y mas al sur pone en contacto a este cuerpo intrusivo con la Formación Silgara. Por otra, parte en la zona de estudio se encontraron evidencias de fallamiento como brechas, cambios de pendientes pronunciadas, hundimientos en el terreno. (Rodríguez y Cantillo, 2006).

500 m al sur este del antiguo reten del DAS hacia la parte Norte de la Universidad de Pamplona (UP) se observaron afloramientos de areniscas bien cementadas con niveles menos resistentes y brechados con alto contenido de fósiles de conchas fracturadas y desarticuladas en una matriz limosa o lodosa con costras de calcita producto del lavado que actúan como cementante de la brechificación. Se destacan cambios considerables en los datos estructurales de estas capas en los puntos de control que se hicieron al Norte de la Universidad de Pamplona. (Rodríguez y Cantillo, 2006).

-Falla Cristo Rey: Falla de tipo normal, con rumbo este-oeste. Afecta las rocas de la formación Aguardiente y Tibu-Mercedes, generando un paisaje de origen estructural-denudacional, la estructura afecta parte del basamento donde reposan discordantemente depósitos de ladera tipo coluvion, donde se desarrollo el urbanismo de los barrios Juan XXIII.

-Falla El Escorial: Sistema de fallas con rumbo este-oeste, cortadas por una falla de contacto. La falla afecta rocas de la formación Aguardiente y de la formación Tibu-Mercedes y parte de algunos afloramientos de la formación Girón que afecta los depósitos presentes en el valle de la quebrada El Escorial. (POT, 2002).

2.3 Geología de la Zona de Estudio

la geología del lugar de estudio está caracterizada por dos grandes zonas (Figura 2).

Zona 1: Esta compuesta por arenitas fedespáticas con diferentes intercalaciones de piedra caliza en conjunto con shales, margas, y arenitas glauconilitas las cuales pertenecen a un edad específica denominada Berremiano-Albianoo. (Figura2)

Zona 2: Se compone de ortogneises graníticos a tonalíticos y paragneises de composición anfíbolítica y textura migmatítica los cuales estan comprendidos con la edad ordovicico-llandovery. (Figura2) (SGC, 2012).

3 PERFILES TOPOGRÁFICOS

Los perfiles se trazaron en la zona alta del barrio Juan XXIII, de los cuales uno es paralelo a la vía nacional Pamplona-Bucaramanga y el otro perpendicular a esta, donde se realizó el levantamiento topográfico tomando niveles cada 2 m, con la finalidad de obtener la altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m) en el terreno. Anexo a esto se utilizo un equipo de ubicación satelital

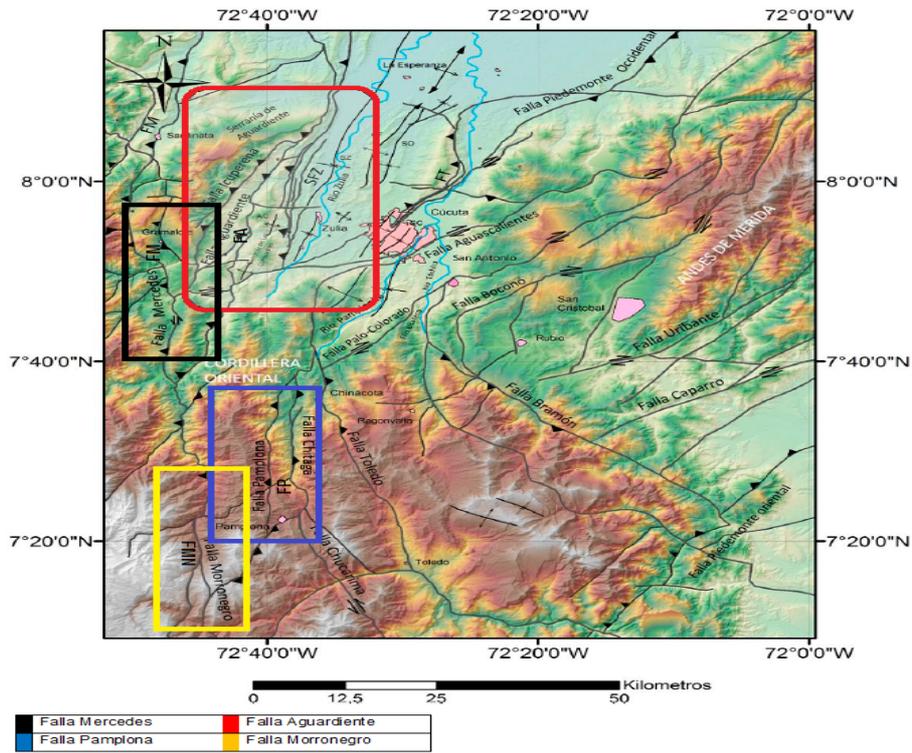


Figura 1. Mapa de localización y distribución de los principales trazos de falla en la zona de estudio propuesta. SFZ= Sistema fallas del Zulia, FM= Falla Mercedes, FA= Falla Aguardiente, FP= Falla Pamplona, FMN= Falla Morronegro, FT= Falla Tasajero, SZ= Sinclinal del Zulia, AT= Anticlinal de Tasajero, SO= Sinclinal de Oripaya, AC= Anticlinal de los Compadres. Fuente: Oviedo, 2015.

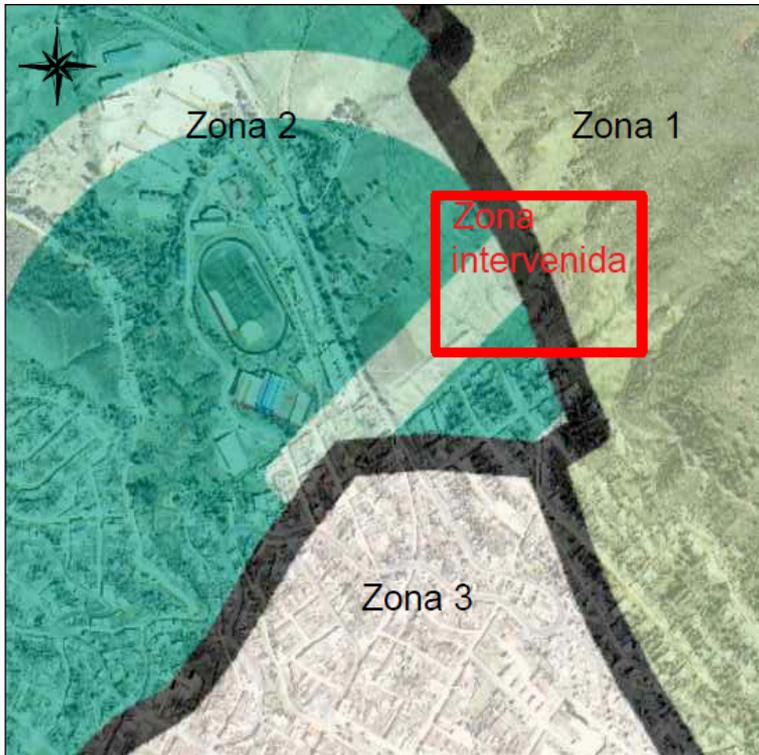
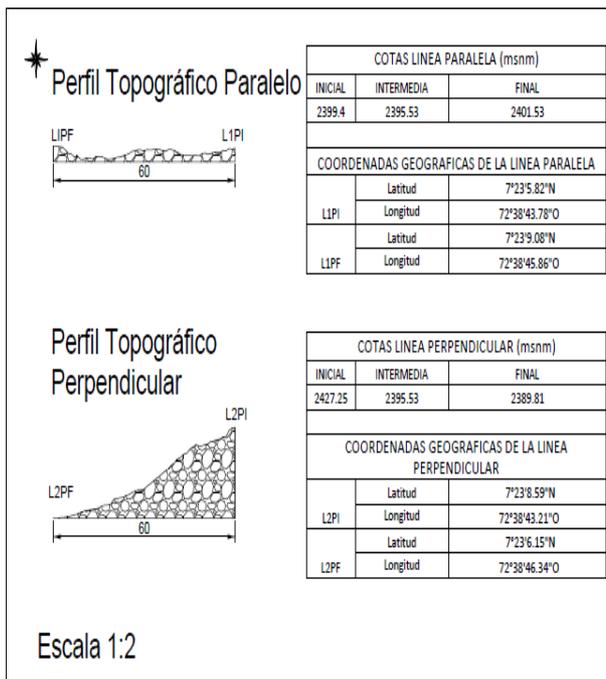


Figura 2. Geología presente en la zona de estudio y lugar de intervención Zona 1: Arenitas fedespaticas y Zona: Ortogneises graníticos . Fuente: Servicio Geológico Colombiano, 2015.

GPSMAP 64s (2016) de la empresa GARMIN con el cual se determinó las coordenadas geográficas en los extremo de cada línea con la objeto de conocer su longitud y latitud teniendo un margen de error de 2 m aproximadamente (Figura 3).

Figura 3. Perfil Paralelo y Perpendicular a la vía con sus respectivos datos de cotas y coordenadas geográficas, para las dos líneas de estudio con punto inicial y final. Fuente: Autores



4 REFRACCIÓN SÍSMICA

4.1 Adquisición de datos

El método de Refracción Sísmica y MASW fue aplicado en la zona de estudio, del barrio Juan XXIII en la ciudad de Pamplona, los cuales consisten en la realización de un tendido sísmico o línea de refracción (Figura 4), donde se disponen en superficie una serie de sensores (geófonos) a una distancia conocida del extremo del tendido, en el punto de disparo, se generan ondas sísmicas con la ayuda de un mazo (fuente), produciendo vibraciones que se propagan por el subsuelo y son detectadas por cada uno de los sensores en el tendido.

La toma de datos en campo se realizó utilizando un sismógrafo Geode (Geometrics, 2010) de 24 canales (geófonos), conectado a un computador portátil el cual almacenaba los registros sísmicos obtenidos para posteriormente ser procesados mediante el software de adquisición (Geometrics Seismodule Controller)(Geometrics, 2000). Inicialmente se trazo un tendido sísmico de 120 m, basado en los perfiles topográficos. donde se instalaron en el terreno los geófonos conectados mediante un cableado (trigger y cable sísmico), ubicando el primer geofono en el punto inicial de la línea L1, el segundo a 10 m del primero y los restantes a 5 m de separación. Posteriormente se golpeó una platina metálica, ubicada

a un metro del geófono perpendicular a la línea, con un mazo de 16 Lb realizando dos series de 10 golpes en su punto inicial y luego cada 30 m hasta completar su extensión (Tabla 1). El proceso descrito anteriormente se repite para línea L 2.

Tabla 1. Metodología Refracción Sísmica. Fuente: Autores.

LINEA	LONGITUD DE LA LINEA (m)	DISTANCIA AL OFFSET (m)	SEPARACION DE RECEPTORES (m)
L1	120	10	5
L2	120	10	5

NUMERO DE CANALES	NUMERO DE STACK	NUMERO DE SHOTS	DISTANCIA DE CADA DISPARO
24	10	5	0, 30, 60, 90, 120
24	10	5	0, 30, 60, 90, 120

4.2 Procesamiento de datos

El procesamiento de datos se realizó a partir de la línea paralela con la finalidad de entregar los resultados del método empleado. En el módulo Pickwin (Pick First Breaks or Dispersion Curves)(SeisImager, 2009) se observaron los datos crudos. A estos datos se le realizó el picado de los primeros arribos (Figura 5), de la onda P, para cada uno de los disparos, y así obtener las curvas para la asignación de capas. Realizado el picado, se usa el módulo de plotrefra (Refraction Analysis)(SeisImager, 2009) donde se asignan tres capas de colores diferentes, esto debido a los cambios de pendiente en las curvas(Figura 6).

Una vez realizada la asignación de capas se obtiene un modelo preliminar del perfil del suelo con coordenadas de elevación geográfica el cual se obtiene tres capas con diferentes velocidades cada una de ellas (Figura 7-A) muestran una alta confiabilidad en los resultados con errores cuadráticos medios (RMS) iguales a 1.3 ms, obteniendo el modelo de tomografía inicial con velocidades que oscila entre 300 ms a 3000 ms (Figura 7-B), dando características más detalladas del terreno y sus profundidades, luego se realiza el modelo de inversión después de iterar 20 veces generando un RMSE= 4.55 ms cumpliendo con el rango admitido de error para continuar con su procesamiento(Figura 7-C), Por último se determina la profundidad máxima mediante el trazado de rayos al modelo invertido del gráfico, en el cual se logra determinar la profundidad máxima con un valor de 26.20 m siendo aproximadamente la cuarta parte de la longitud total de la línea paralela (Figura 7-D) generando la relación existente entre la curva de tiempo observado en función del tiempo calculado.

En la tabla 3 y 4 se muestra la estratificación del suelo donde se observaron cinco capas con sus respectivas profundidades en tres tramos de la línea (inicial, intermedio, final) excepto la última capa debido a que es imposible obtener su profundidad, clasificándose mediante la tabla 2 de acuerdo con los rangos de velocidades adquiridas, donde a partir de estas se realizaron perfiles geológicos obteniendo suelos con materiales superficiales, arenas secas y arcillas saturadas (Figuras 8 y 9).



Figura 4. Fotografía de trabajo en campo a) Funcionamiento Geode ultra-lite de la empresa Geometrics b) Tendido de la línea sísmica en la zona de estudio Juan XXIII. Fuente: autores.

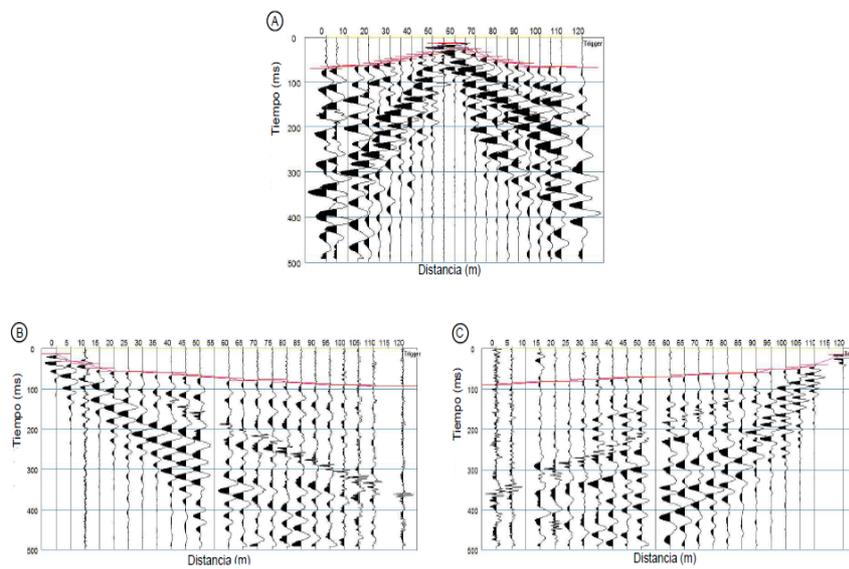


Figura 5. Grafica de los primeros arribos A) shot 60 m B) shot 120 m C) shot 0 m Fuente: Autores.

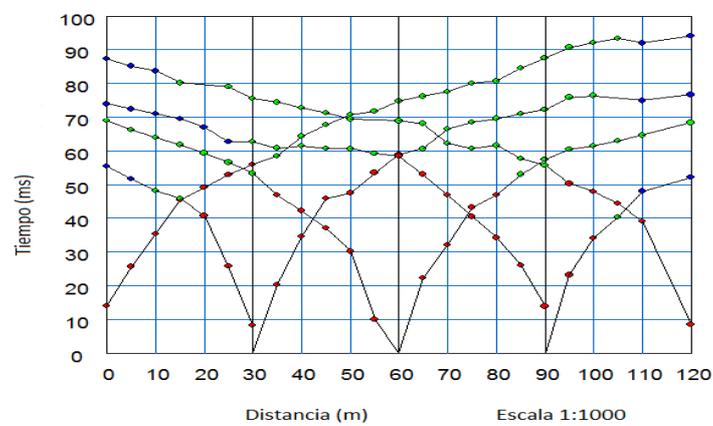


Figura 6. Curvas de tiempos de propagación de ondas vs distancia para la asignación de capas. Fuente: autores.

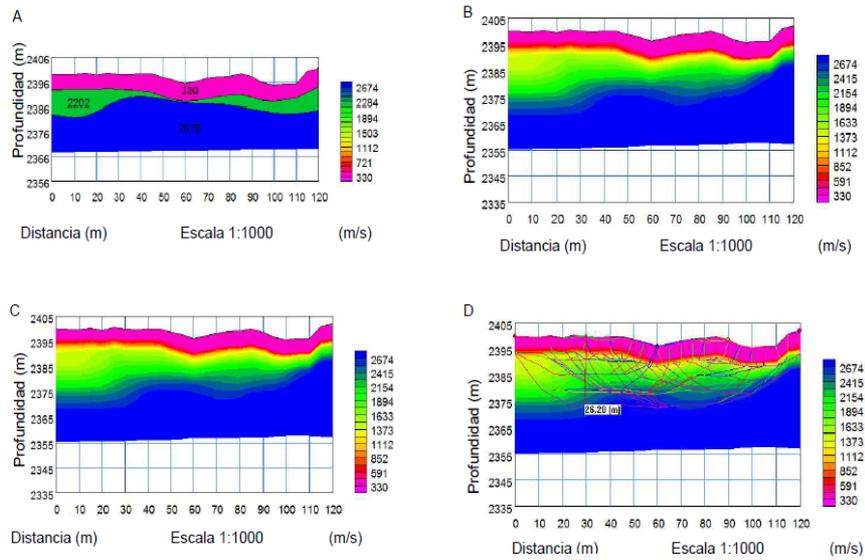


Figura 7. Procesamiento y modelación por mínimos cuadrados y tomografía donde A) Modelo inicial B) Modelo de tomografía inicial suavizado C) Modelo de inversión D) Trazado de rayos al modelo invertido. Fuente: autores.

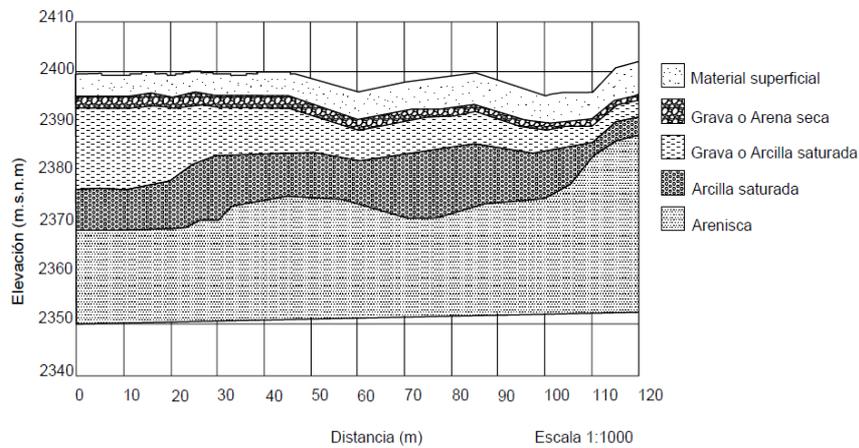


Figura 8. Perfil geológico según los rangos de velocidades de las ondas P donde se observan 5 capas en la línea paralela. Material superficial, grava o arena seca, grava o arcilla saturada, arcilla saturada y arenisca. Fuente: autores.

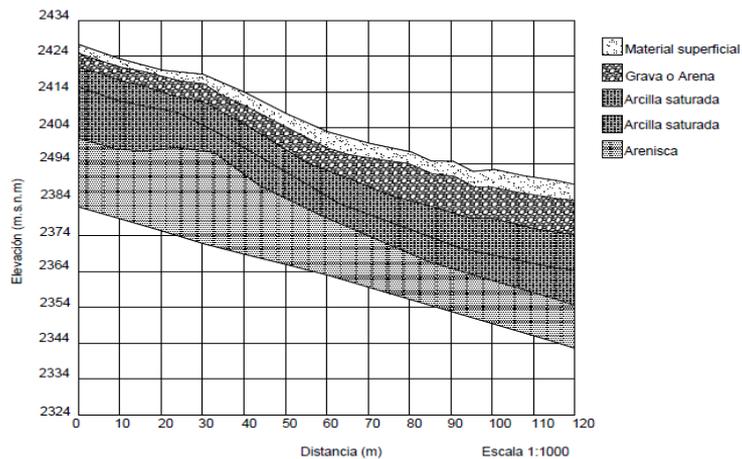


Figura 9. Perfil geológico según los rangos de velocidades de las ondas P donde se observan 5 capas en la línea perpendicular. Material superficial, grava o arena, con 3 capas de arcilla saturada. Fuente: autores.

Tabla 2. Velocidades de onda P (Vp). Fuente: Gutierrez y Buitrago, 2016.

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

Tabla 3. Caracterización línea Paralela con su respectivo espesor (E) inicial, intermedio y final. Fuente: Autores.

CAPA	E I(m)	E II(m)	E III(m)	Vp (m/s)	MATERIAL
1	4.23	5.4	5.55	330-606	Material superficial
2	2.57	1.5	1.47	606-882	Grava o arena seca
3	9.62	3.3	1.43	882-1709	Grava o arena seca/ arcilla saturada
4	8.43	5.6	3.57	1709-2536	Arcilla saturada
5	indet	indet	indet	>2536	Arenisca

Tabla 4. Caracterización línea Perpendicular con su respectivo espesor (E) inicial(I), intermedio(II) y final(II). Fuente: Autores.

CAPA	E I(m)	E II(m)	E III(m)	Vp (m/s)	MAT.
1	2.23	5.4	6.72	300-600	Material superficial
2	3.05	2.6	3.02	600-900	Grava o arena
3	2.81	3.1	4.09	900-1800	Arcilla saturada
4	9.86	7.7	11.9	1800-2700	Arcilla saturada
5	indet	indet	indet	>2700	Arenisca

5 METODO DE MASW

5.1 Adquisición de datos

El método MASW analiza las propiedades de propagación de las ondas sísmicas superficiales, las cuales se propagan horizontalmente desde la fuente emisora hasta los geófonos. Para la captación de datos se realizó un tendido sísmico de 24 m y partiendo del centro de la línea L1 se ubicaron 24 geófonos a una separación de 1 m. Los golpes se generaron a 10 m de los puntos limitantes (Tabla 5). Con el software de adquisición (Geometrics Seismodule Controller) (Geometrics, 2000) se registraron los datos para posteriormente ser procesados mediante el software SeisImager (2009) de la empresa Geometrics.

Tabla 5. Parámetros de adquisición de datos respecto al método MASW. Fuente: Autores

PARÁMETROS	DATOS
Línea intervenida	L1
Geófonos	24
separación entre geófonos	1.0
Stack	1
Shot	10
Longitud de la línea (m)	24
Distancia al stack (final e inicial)	10
Tiempo de retardo (s)	0.1
Tiempo de registro (s)	0.25
Tiempo de muestreo (ms)	0.5

5.2 Procesamiento de datos

El procesamiento de datos para este método se realiza mediante los módulos Pickwin (Pick First Brecks or Dispersion Curves) y WaveEq (Surface Wave Analysis) (SeisImager, 2009), estos datos corresponden al registro 1, donde se visualiza *shot* 1 con posición de fuente en (-10) del geófono 1 (Figura 10- A). A partir de anterior, se procede a la transformación de la velocidad de fase-frecuencia, utilizando un valor máximo de velocidad de las ondas superficiales. Es necesario realizar un picado (puntos rojos) como se puede ver en la (Figura 10-B), para generar la curva de dispersión (Figura 10-C), la cual es definitiva en la obtención de los perfiles de velocidad y profundidades (Figura 10-D). En los perfiles se detallaron 5 capas con velocidades que oscilan entre (392-567)(m/s) (Figuras 11 y 12), donde se clasificaron mediante la tabla 6 como materiales de suelos muy competentes y posibles gravas, también se realiza una clasificación mediante el reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, en donde se obtuvieron suelos densos o roca blanda perteneciente a un tipo de perfil C. (Tabla 7 y 8).

Tabla 6. Velocidades de onda S (Vs). Fuente: Gutierrez y Buitrago, 2016.

MATERIALES	Vs (m/s)
Material superficial y suelos incompetentes	50-150
Suelos competentes (arenas, arcillas, limos)	150-350
Suelo muy competente y gravas	350-600
Roca erosionada	600-800
Roca sólida	>800

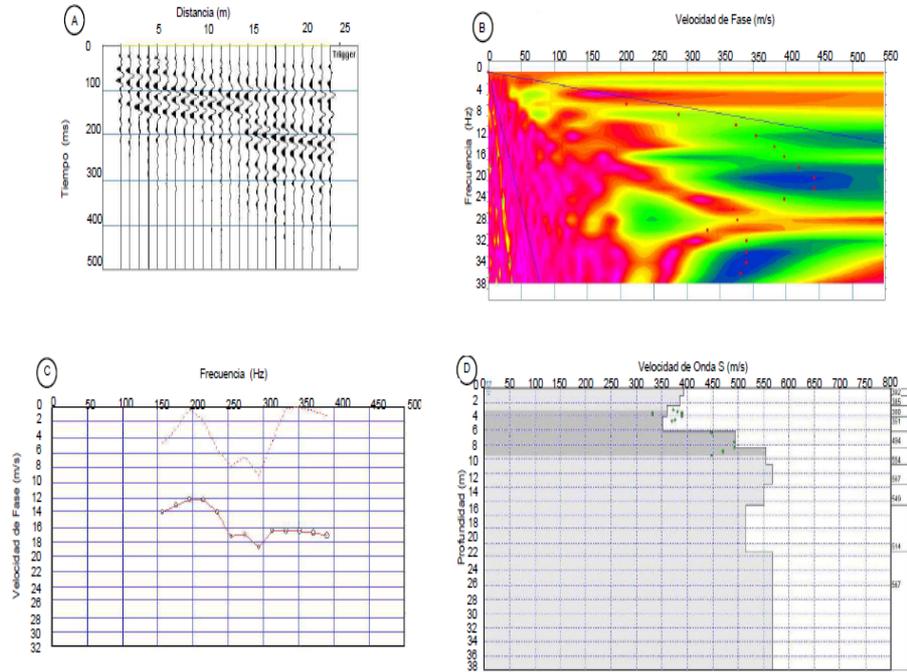


Figura 10. Procesamiento de datos del método de MASW. A) Ondas superficiales B) Transformación de velocidad de fase-frecuencia C) Curva de dispersión D) velocidad de onda S. Fuente: Autores.

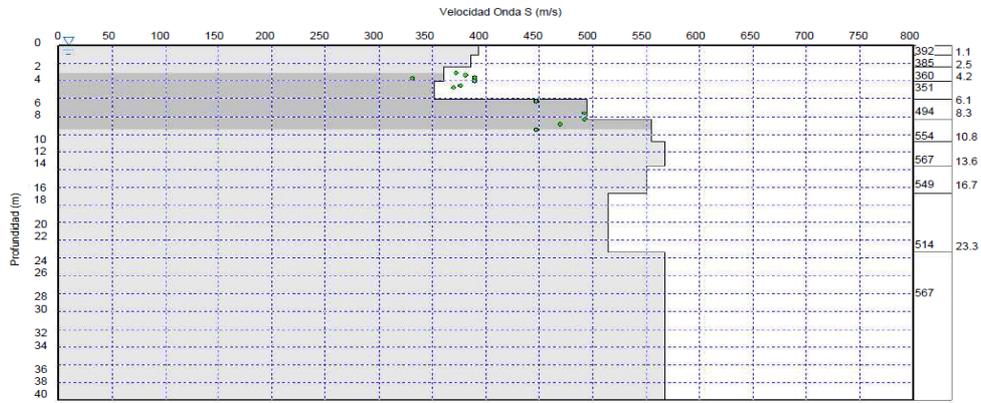


Figura 11. Perfil de velocidad y espesor de la onda S línea paralela. Fuente: Autores.

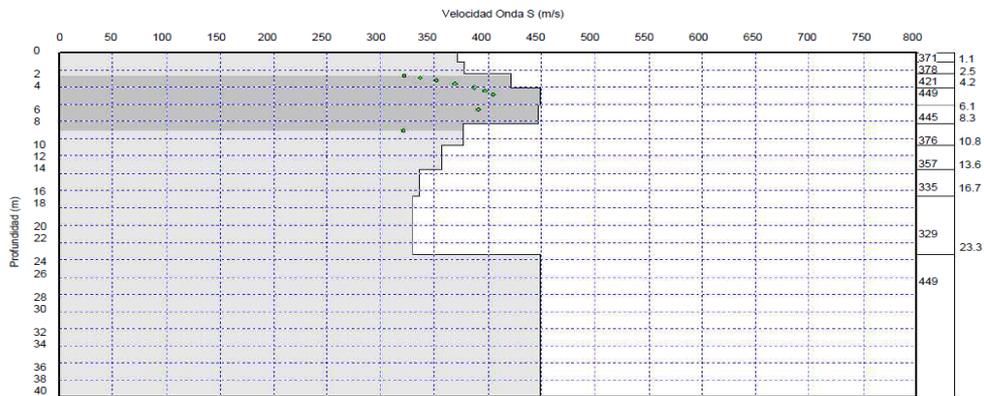


Figura 12. Perfil de velocidad y espesor de la onda S línea perpendicular. Fuente: Autores.

Tabla 7. Caracterización Línea paralela respecto a MASW- shot 1. Fuente: Autores.

CAPAS	ESP (m)	Vs (m/s)	MATERIAL	MATERIAL (NSR-10)
1	4.36	392-360	Suelos muy competentes y gravas	C:Suelos densos o roca blanda
2	2.18	360-351	Suelos muy competentes y gravas	C:Suelos densos o roca blanda
3	3.98	351-554	Suelos muy competentes y gravas	C:Suelos densos o roca blanda
4	6.85	554-549	Suelos muy competentes y gravas	C:Suelos densos o roca blanda
5	indet	549-567	Suelos muy competentes y gravas	C:Suelos densos o roca blanda

Tabla 8. Caracterización Línea paralela respecto a MASW- shot 2. Fuente: Autores.

CAPAS	ESP (m)	Vs (m/s)	MATERIAL	MATERIAL (NSR-10)
1	4.5	50-449	Suelos muy competentes y gravas	C:Suelos densos o roca blanda
2	1.59	449-445	Suelos muy competentes y gravas	C:Suelos densos o roca blanda
3	2.56	445-376	Suelos muy competentes y gravas	C:Suelos densos o roca blanda
4	6.68	376-335	Suelos muy competentes y gravas	C:Suelos densos o roca blanda
5	indet	329-449	Suelos muy competentes y gravas	C:Suelos densos o roca blanda

6 PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SUELO

Después de haber obtenido las velocidades de ondas P y S mediante los métodos de refracción sísmica y MASW, se determinan los parámetros mecánicos y dinámicos de suelo (Tabla 9) como capacidad portante (q_a) el cual es la capacidad que tiene el terreno de soportar esfuerzos, es la presión de contacto promedio máxima que se genera entre el cimiento y el suelo sin que este último produzca fallas de corte, módulo de Poisson (σ) este determina la

capacidad que tiene un material que se deforma longitudinalmente al aplicar una carga axial, módulo de rigidez (G) es la relación entre el esfuerzo transversal unitario y el desplazamiento relativo de los planos, es una medida de la deformación cortante, y el módulo de Young (E) que es la relación entre el esfuerzo unitario y la deformación longitudinal unitaria. Estos parámetros permiten conocer las propiedades elásticas y tener una mejor caracterización del suelo (Gutierrez y Buitrago, 2016) y se expresan mediante las siguientes formulas:

$$nqa = qf = \frac{V_s^2}{1590} \quad (1)$$

n = Factor de seguridad

V_s = Velocidad de Onda S

$$\sigma = \frac{(\frac{V_P}{V_S})^2 - 2}{2(\frac{V_P}{V_S})^2 - 2} \quad (2)$$

V_P = Velocidad de onda P

$$G = \rho V_S^2 \quad (3)$$

ρ = Densidad del material

$$E = 2G(1 + \sigma) \quad (4)$$

Tabla 9. Parametros dinamicos del suelo. Fuente: Autores.

PARAMETRO	VALOR
CAPA 1	
Capacidad portante ultima (q_f)	7.52-1459
capacidad portante admisible(q_a)(KPa)	1.87-364
Módulo de Poisson (σ)	0.494
Módulo de rigidez (G)(KN/m^2)	4656-229457
Densidad del terreno Kg/m^3)	1862
Módulo de Young (E)(Pa)	13912
CAPA 2	
Capacidad portante ultima (q_f)	1459-1428
capacidad portante admisible(q_a)(KPa)	365-357
Módulo de Poisson (σ)	0.3707
Módulo de rigidez (G)(KN/m^2)	229958-455500
Densidad del terreno Kg/m^3)	1866
Módulo de Young (E)(Pa)	1212086
CAPA 3	
Capacidad portante ultima(q_f)	1427-953
capacidad portante admisible(q_a)(KPa)	357-238
Módulo de Poisson (σ)	0.3707-0.466
Módulo de rigidez (G)(KN/m^2)	372665-266057
Densidad del terreno Kg/m^3)	1881
Módulo de Young (E)(Pa)	1021624-780398
CAPA 4	
Capacidad portante ultima (q_f)	953-722
capacidad portante admisible(q_a)(KPa)	238-181
Módulo de Poisson (σ)	0.46666-0.489
Módulo de rigidez (G)(KN/m^2)	255194-202574
Densidad del terreno Kg/m^3)	1805
Módulo de Young (E)(Pa)	748535-603265
CAPA 5	
Capacidad portante ultima(q_f)	692-1459
capacidad portante admisible (q_a)(KPa)	173-365
Módulo de Poisson (σ)	0.4854
Módulo de rigidez (G)(KN/m^2)	379395
Densidad del terreno Kg/m^3)	1881
Módulo de Young (E)(Pa)	1127106

Figura 13. Fotografía de trabajo en campo a) funcionamiento terrameter LS1 de la empresa ABEM. b) tendido del ensayo en la zona de estudio Juan XXIII. Fuente: Autores.



7 TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

7.1 Adquisición de datos

El procedimiento para obtener los modelos de resistividad del terreno consiste en inyectar una cantidad conocida de corriente al subsuelo y medir la diferencia de potencial entre dos puntos. El proceso se repite en todo el área de inspección y, una vez obtenidas estas medidas se dispone de una distribución de resistividades experimentales a lo largo del subsuelo. Dado que el subsuelo es heterogéneo, este conjunto de resistividades no corresponde a la distribución real, el cálculo para obtener el modelo de resistividades reales del subsuelo se realiza a través de técnicas de inversión utilizando un sistema iterativo. (Quintana, 2013).

Los perfiles de resistividad fueron obtenidos mediante el uso del método gradiente (Figura 13), el cual permite ver el comportamiento eléctrico del subsuelo a una sola profundidad a lo largo de un perfil, con este método se pueden detectar principalmente cambios de resistividad y cargabilidad a la profundidad determinada principalmente de cuerpos verticales. La toma de datos en campo se realizó utilizando un equipo terrameter LS1 (2012) de la empresa ABEM, se instalaron sobre las líneas de ensayo electrodos metálicos introduciéndolos en el terreno un $\frac{1}{4}$ de su altura con un espaciamiento de 3 m entre sí, interconectados a cables multiconectores los cuales se acoplaron a la unidad central, finalmente se configura el dispositivo mediante parámetros expuestos en la tabla 10. Concluida la configuración, se transfieren estas especificaciones al equipo de exploración eléctrica para que ésta pueda realizar automáticamente toda la secuencia de mediciones prefijada.

7.2 ABEM TERRAMETER LS

Es un sistema de adquisición de datos para mediciones de auto potencia (SP), resistividad y polarización inducida en dominio del tiempo (IP), el cual tiene la finalidad de dar como resultado

levantamientos geoelectrónicos de imágenes tomográficas, generando una radiografía del suelo a cierta profundidad dependiendo el método implementado, realizado esto el equipo genera los valores de resistividad del material existente, dando así información de las diferentes capas que se tienen en la zona de intervención.

Tabla 10. Configuración inicial del equipo para el método gradiente. Fuente: Autores.

CONFIGURACIÓN DEL RESISTIVÍMETRO (ABEM TERRAMETER LS)	PARÁMETROS
INICIO DE EJECUCION DE TAREA	
Extensión	2x21
Protocolo	Gradiente
Espaciado mínimo de electrodos X (m)	3
Espaciado mínimo de electrodos Y (m)	0
Espaciado mínimo de electrodos Z (m)	0
RECEPTOR	
Modo de medida	RES
Número mínimo de medidas	1
Número máximo de medidas	1
Límite de error	1.0
Tiempo de retraso	0.3 s
Numero de ventanas IP	2
Registre la forma de onda completa	No
Frecuencia de línea de alimentación	50 Hz
Frecuencia de muestreo	1000/1200 Hz
TRANSMISOR	
Corriente mínima	5 mA
Corriente máxima	10 mA
Potencia máxima	250 W
Voltaje máximo de salida	600 V
Prueba de electrodo	Enfocar uno
Mal electrodo	20kOhm
Falla de electrodo	300KOhm
Corriente de prueba de electrodo	20 mA
Margen de variación de carga (10)	20

7.3 Procesamiento de datos

Para realizar el procesamiento de datos de la línea paralela, se utilizó el programa Res2Dinv-v3.59g (Geomoto Software, 2010) con el cual se determinó el modelo de resistividades bidimensionales a partir de los datos obtenidos en la geoelectrónica (Tabla 11), los cuales se clasificaron según la figura 14. Inicialmente se obtuvo en 2D la distribución de puntos de datos de la pseudosección, mostrando así la separación existente entre electrodos de potencial y los electrodos de corriente junto a su variación estándar, dando a conocer que los datos reflejados son de buena calidad porque carecen de picos con cambios abruptos que haría necesario filtrar los datos (Figura 15).

Después se realizó la inversión de la pseudosección, se ingresó un factor de amortiguamiento inicial de 0.15 que depende de la calidad de los datos junto a un factor de amortiguamiento mínimo de 0.03, seguidamente se opta por no dar un factor a la primera capa debido a la buena continuidad que tienen los datos.

Posteriormente se realizó un refinamiento vertical utilizando una malla fina (factor < 50) debido a que el factor geométrico usado fue de 36.7 el cual está comprendido en el rango de valores generados como sugerencia del programa de procesamiento, seguido de la utilización de elementos finitos debido a que se trabajó con la topografía de la zona. Luego a esto, se elige el método robusto con el cual se realizó procesamiento de los datos homogenizando las zonas o cuerpos con valores de resistividad homogéneos, utilizando así la ecuación matemática de mínimos cuadrados de Gauss-Newton estándar, generando así un modelamiento topográfico.

Los dos modelos de resistividad eléctrica presentan un porcentaje alto de confiabilidad ya que poseen errores cuadráticos medios RMS menores al 5 %, después de iterar 14 veces e ir reduciendo el porcentaje de error para cada caso (Figura 16). De igual manera se realizó el procedimiento para la línea perpendicular (Figura 19) clasificando su suelo en cada estrato encontrado (Tabla 12).

Figura 14. Clasificación de suelos de acuerdo a resistividades. Fuente: Gómez, 2016.

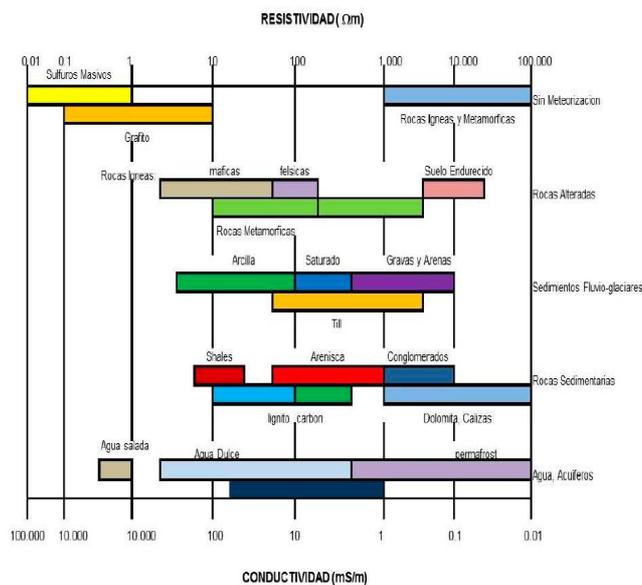


Tabla 11. Datos iniciales de la sección con su topografía. Fuente: Autores.

DATOS TOMOGRAFIA ELECTRICA LINEA 1 Y 2	LINEAS EN ESTUDIO
3	Espaciamiento electrodos
11	Tipo de arreglo
15	Gradiente
Tipo de medición (0= Resistividad aparente, 1= Resistencia)	Titulo
1	Resistividad aparente
512	Numero de puntos
2	Distancia de la superficie en x
0	Polarizacion inducida
num electrodos, posicion electrodos, resistencia	Datos de puntos
topography in separate list	Linea topografica
2	Distancia en superficie
59	Numero de puntos topográficos
1	registro
Global coordinates present	Coordenadas
Number of coordinate points	Numero de coordenadas
2	Espaciamiento
Distancia entre electrodos, altura (msnm)	Datos y coordenadas
1	P inicial y eletrodo

Figura 15. Distribución de puntos de datos de la pseudosección línea paralela. Fuente: Autores.

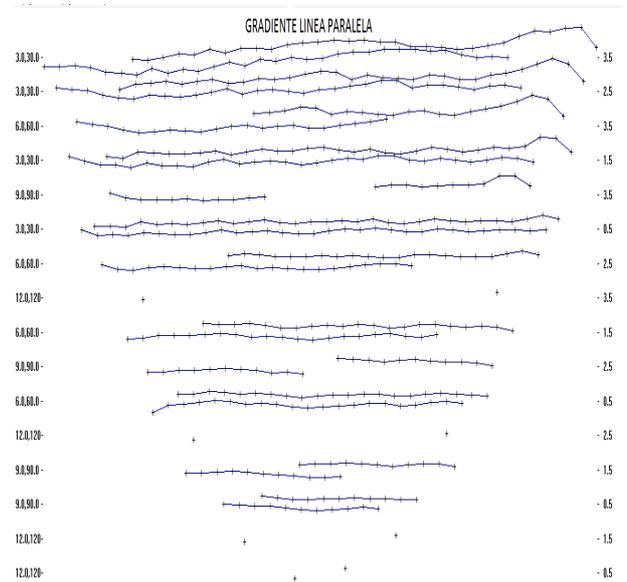


Tabla 12. Porcentaje de error e iteraciones en las líneas en estudio. Fuente: Autores.

Línea	N. de iteraciones	%Error
Paralela	11	4.3
Perpendicular	14	4.3

En el perfil de tomografía de resistividad eléctrica de la línea

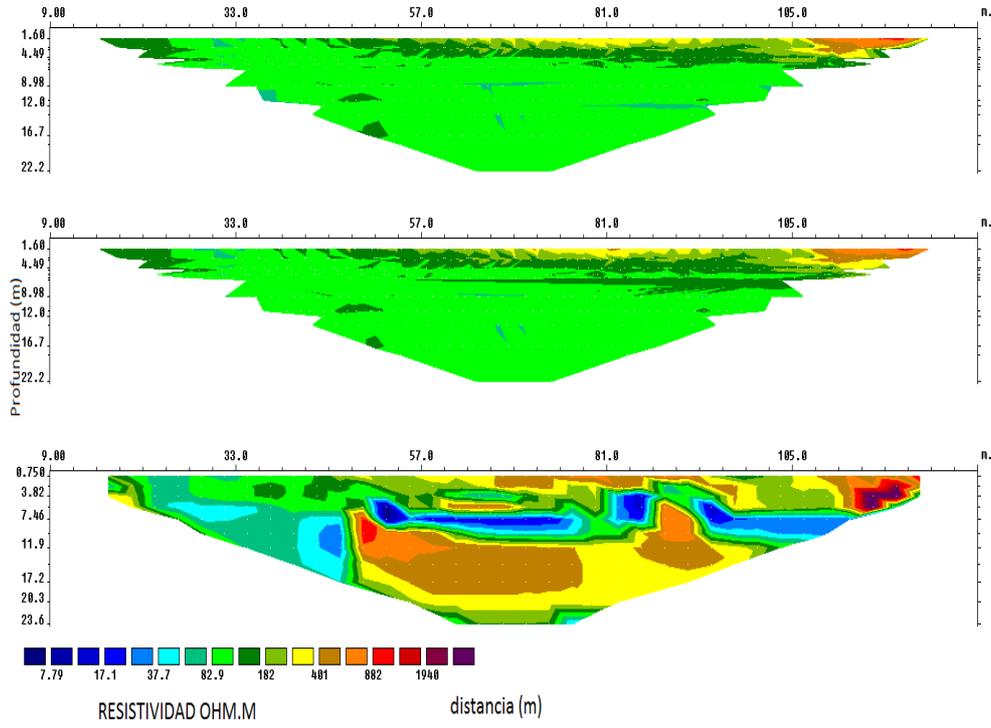


Figura 16. Modelo bidimensional de resistividades del subsuelo para la línea paralela./ Pseudosección de la resistividad aparente medida en campo./ Pseudosección de resistividad aparente calculada./ Sección de resistividad del modelo inverso. Fuente: autores.

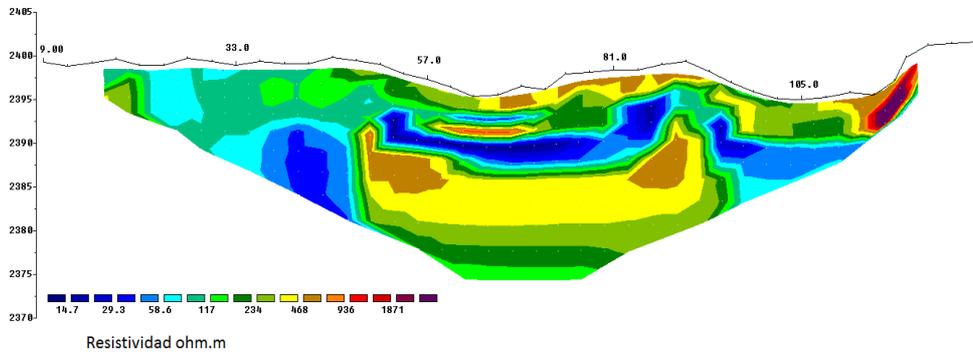


Figura 17. Modelo de resistividad con topografía línea paralela. Fuente: Autores.

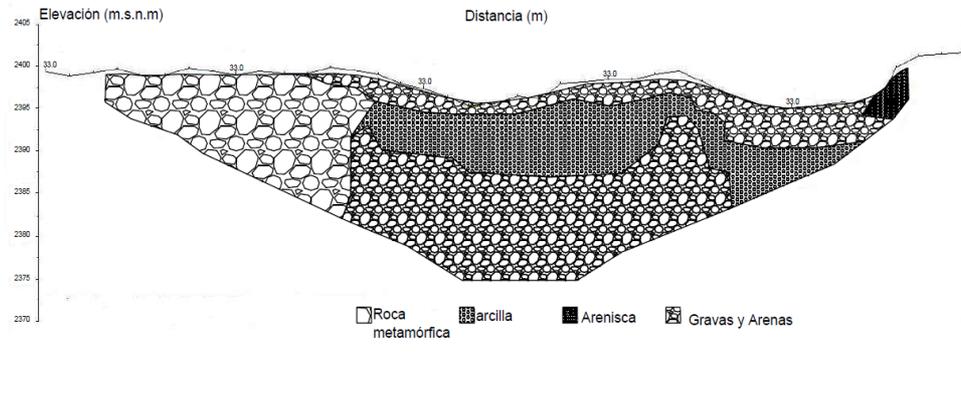


Figura 18. Perfil geológico línea paralela. Fuente: Autores.

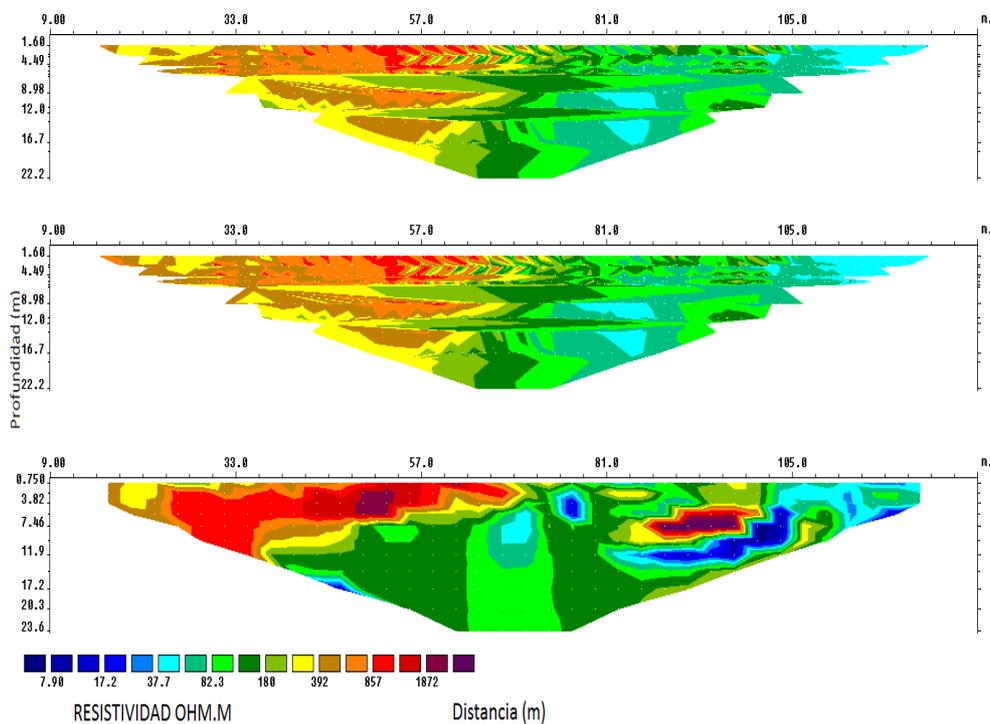


Figura 19. Modelo bidimensional de resistividades del subsuelo para la línea perpendicular./ Pseudosección de la resistividad aparente medida en campo./ Pseudosección de resistividad aparente calculada./ Sección de resistividad del modelo inverso. Fuente: autores.

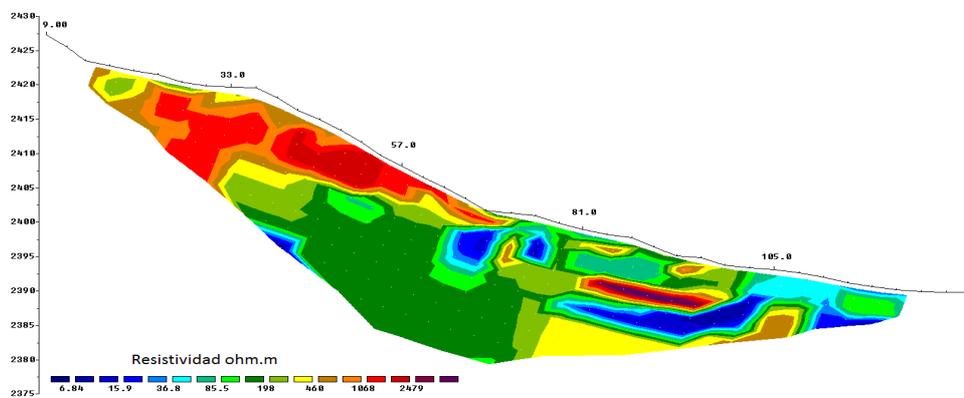


Figura 20. Modelo de resistividad con topografía línea perpendicular . Fuente: Autores.

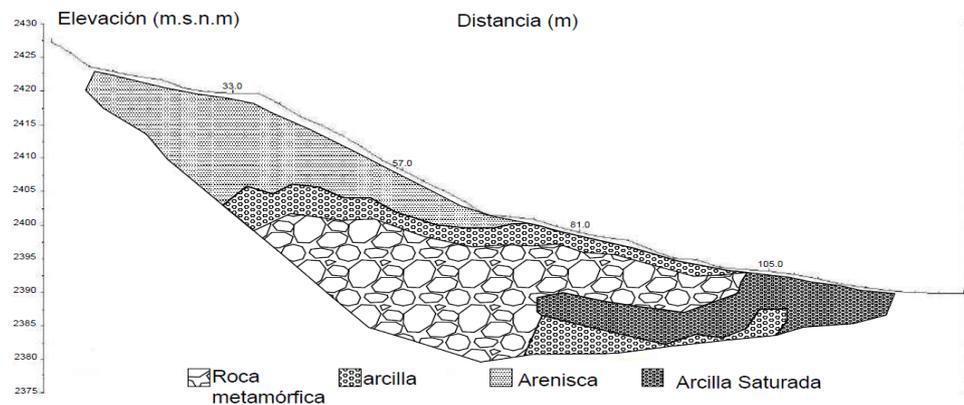


Figura 21. Perfil geológico línea perpendicular. Fuente: Autores.

paralela (Figura 17) es posible identificar una capa inicial con una variación en su profundidad a lo largo del trazado no mayor a 6 m, cuyos valores de resistividad se encuentran entre 438 a 936 Ohm.m con un punto en el extremo de la línea que presenta un valor alto de resistividad de 1871 Ohm.m, obteniendo así los posibles materiales existentes en la zona (Tabla 13) con un porcentaje de error en su cálculo de 4.3 %. Posteriormente se encuentra una capa nueva que posee valores de resistividad menores, oscilando entre 14.7 a 117 Ohm.m, seguidamente se observa una posible falla en la geología del terreno a los 57 y 85 m a partir del punto inicial (Figura 16). Finalmente se encuentra una última capa que presenta características similares a la primera respecto a sus valores de resistividades, pero con un espesor aproximado de 15 metros, siendo más evidente a partir de 40 m respecto al punto de referencia terminando en los 90 m de la línea. Respecto a el perfil de la línea perpendicular a la paralela (Figura 20) se identifican valores de resistividades altas que están entre 460 a 2479 Ohm.m a partir del punto inicial hasta los 70 m de la línea y con un espesor que varía entre 2 a 15 m. Seguidamente se tiene un cambio en las resistividades abrupto que oscilan entre 85.5 a 198 Ohm.m a partir de los 70 m, dando así a conocer un cambio en el material existente. También, se observa una disminución considerable que está entre 6.84 y 36.8 Ohm.m al final de la línea. Con estos valores se logra determinar el supuesto material presente en la zona dependiendo los cambios en las resistividades (Tabla 14). Por ultimo se realizaron dos perfiles geológicos basados en la caracterización del suelo a partir de las resistividades obtenidas. (Figura 18 y 21).

Tabla 13. Caracterización respecto las resistividades en la línea paralela. Fuente: Autores.

Resistividad	Material
100-300	Roca metamórfica
400-500	Gravas y arenas
10-80	Arcilla
900-2000	Arenisca

Tabla 14. Caracterización respecto las resistividades en la línea perpendicular. Fuente: Autores.

Resistividad	Material
80-200	Roca metamórfica
400-700	arcilla
5-50	Arcilla saturada
1000-2500	Conglomerados-arenisca

8 ENSAYOS DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)

El ensayo de penetración estándar consiste en contar el número de golpes que se necesitan para introducir dentro del suelo, en este caso con variaciones de medio metro a un metro, el toma muestras es golpeado con una energía constante, con una masa en caída libre de 80 kg

y a una altura de más de 70 cm. Este método se hizo con el fin de analizar las muestras obtenidas en campo mediante los respectivos laboratorios y correlacionar estas características con los datos obtenidos en los diferentes métodos geofísicos implementados en la zona de estudio. Dicho procedimiento se hizo a 10 m abajo del centro de la línea L2 (Figura 22).

9 LABORATORIOS Y RESULTADOS

9.1 Contenido de humedad

Este ensayo se realiza con la finalidad de determinar el porcentaje de agua presente en el suelo en intervención (Figura 23), mediante el proceso de secado al horno por 24 horas a 110 °C, obteniendo los resultados expresados en la tabla 15, mediante la siguiente ecuación:

Figura 22. Muestras en laboratorio de humedad. Fuente: Autores.



$$W = w_w / w_s * 100 \% (1)$$

donde:

W = Contenido de humedad expresado en porcentaje.

w_w = Peso del agua existente en la masa de suelo.

w_s = Peso de las partículas sólidas.

Tabla 15. Contenido de humedad. Fuente: Autores.

muestra	Peso muestra seca (g)	Peso muestra seca (g)	% humedad
1	146,3	119,4	22,53
2	129,7	109,3	18,66
3	85	67	26,87
4	79,2	69,5	13,96
5	94,8	82,8	14,50
6	92,1	79,4	16,0

Figura 23. Muestras en laboratorio de humedad. Fuente: Autores.



9.2 Peso específico del suelo húmedo

El peso volumétrico es la relación existente de la masa del suelo y su volumen, también es conocido como peso unitario que posee el suelo en condiciones naturales, este enayo se realizo por el metodo de parafina (Figura 24). los resultados se pueden ver en la tabla 16 y se obtuvieron mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma_w = w_m / v_m \quad (2)$$

donde:

w_m = Peso de la masa.

v_m = Volumen de la masa.

Figura 24. Muestras en laboratorio de los pesos volumétricos. Fuente: Autores.



Tabla 16. Peso volumétrico del suelo húmedo. Fuente: Autores.

Muestra	$\gamma_w (gr/cm^3)$
1	2.01
2	2.01
3	2.20
4	1.93
5	1.67
6	1.93

9.3 Analisis granulometrico

Su finalidad es obtener la distribución por tamaño de las partículas en las muestras de suelos, donde se determino los diferentes materiales presentes mediante el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)(Braja, 1985).. En la tabla 17 se puede ver que más del 50 % de muestra pasa el tamiz N. #200 obteniendo suelos de partículas finas.

Tabla 17. Peso volumétrico del suelo húmedo. Fuente: Autores.

Tamiz	Peso reternido	Peso ret ajustado	%retenido	%retenido Acumulado	%que pasa
4	24.9	25.75	3.21875	3.21875	96.78125
8	15	15.85	1.98125	5.2	94.8
16	32.5	33.35	4.16875	9.36875	90.63125
20	13	13.85	1.73125	11.1	88.9
30	33	33.85	4.23125	15.33125	84.66875
40	37.1	37.95	4.74375	20.075	79.925
50	29	29.85	3.73125	23.80625	76.19375
60	17.2	18.05	2.25625	26.0625	73.9375
80	25	25.85	3.23125	29.29375	70.70625
100	23	23.85	2.98125	32.275	67.725
200	61	61.85	7.73125	40.00625	59.99375
Fondo	479.4	480.25	60.03125	100.0	0.0
0	790.1	791	98.9	0	0

9.4 Limites de consistencia

Estos límites nos permiten determinar la consistencia de suelos de grano fino y su clasificación. En la tabla 18 se puede ver limites líquidos mayores al 50 % clasificándose como arcillas.

Tabla 18. Determinación de Limites. Fuente: Autores.

Limites de consistencia	
limite liquido	63.47 %
limite plastico	32.36 %
indice de plasticidad	32.87 %

En los resultados obtenidos se determinó la presencia de material superficial y arcillas (Figura 25).

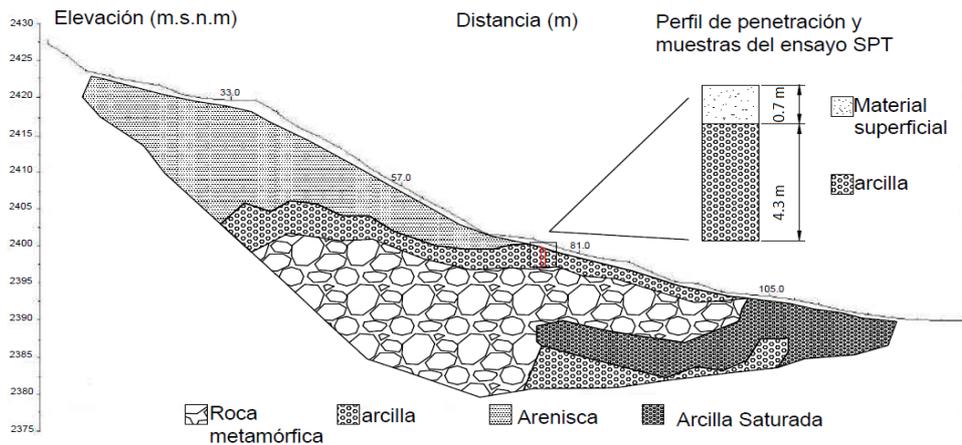


Figura 25. Perfil y muestra del ensayo de penetración estándar STP en el perfil de tomografía de la línea perpendicular. Fuente: Autores.

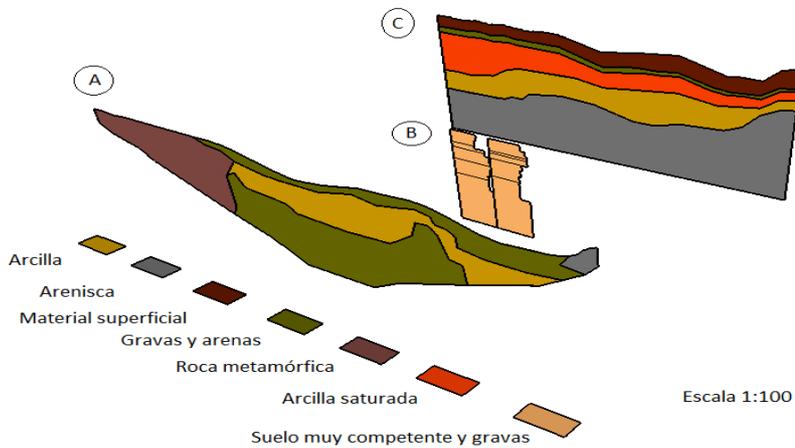


Figura 26. Perfiles geológicos para la línea paralela A) Tomografía de resistividad eléctrica B) MASW C) Refracción sísmica. Fuente: Autores.

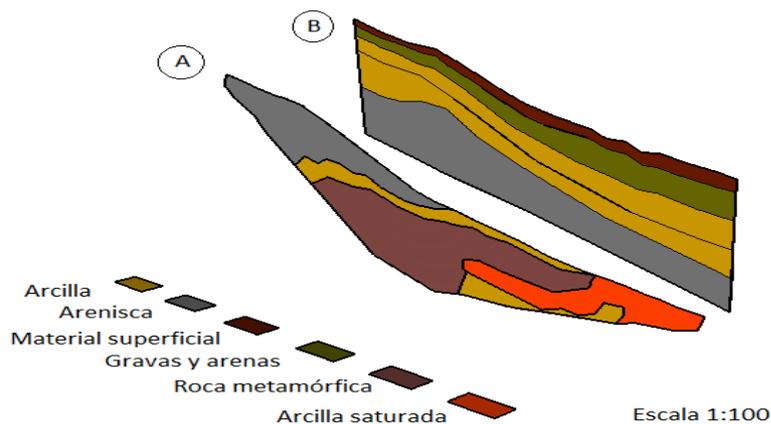


Figura 27. Perfiles geológicos para la línea perpendicular A) Tomografía de resistividad eléctrica B) Refracción sísmica. Fuente: Autores.

Finalmente se realizó un contraste en 3D con los perfiles obtenidos con cada uno de los métodos implementados en la zona de estudio, con la finalidad de visualizar las posibles similitudes en los materiales encontrados en los cinco estratos diferentes, determinando así una relación en el método de refracción sísmica y tomografía eléctrica (Figuras 26 y 27) .

10 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad de Pamplona, al departamento de ingeniería civil por su coordinación en este trabajo, de igual manera a Ecopetrol y Colciencias programa RC0266 de 2013, al grupo de investigación en geofísica y geología Pangea, al Instituto Tecnológico Metropolitano I.T.M. y a Inter-

obras de Santander S.A.S. Por facilitar los quipos necesarios para la realización de las prácticas en campo.

11 CONCLUSIONES

Se realizaron las líneas sísmicas y líneas de ensayo en la zona elegida para el estudio del barrio Juan XXXIII empleando los respectivos criterios exigidos por cada uno de los métodos. Tras adquirir los datos de campo se procesaron con los fundamentos teóricos básicos, arrojando porcentajes de error menores al 5

La aplicación del método de refracción sísmica permitió observar perfiles del subsuelo de manera clara, mostrando cinco capas con sus diferentes espesores y profundidades, obteniendo así valores de velocidad de onda P con rangos entre (300-3000)m/s que pueden estar asociados a material superficial meteorizado, arenas secas y arcillas saturadas.

Se determinó mediante el método MASW la propagación de las ondas superficiales, con valores de velocidad de (50-567) m/s obteniendo perfiles con materiales como suelos competentes y gravas, de igual forma se relacionaron estos datos mediante la NSR-10 clasificándose como suelos densos o rocas blandas. Esto también nos permitió hallar los parámetros dinámicos del suelo tales como: módulo de Young, módulo de Poisson, capacidad portante y módulo de rigidez.

Con en el método de tomografía de resistividad eléctrica se observaron los diferentes contrastes y cambios de resistividad aparente medidos y estimados en las líneas de ensayo con valores que oscilan entre (80-2500) Ohm.m como lo demuestran los perfiles de resistividad presentados en este estudio, permitiendo crear un perfil geológico de la zona predominando materiales como rocas metamórficas, arcillas y areniscas.

Se llevó a cabo una última práctica de SPT donde se obtuvieron muestras a 5 m de profundidad, las cuales se analizaron mediante laboratorios de suelos para corroborar la existencia de los materiales descritos anteriormente. De ahí se concluyó la existencia de materiales finos con Limite Líquidos \geq al 50

Debido a las bajas capacidades portantes del suelo y a los materiales encontrados como arcillas podemos concluir que son suelos de baja resistencia, donde se determinó que el suelo no es apto para la construcción de edificaciones ya que para que estos tipos de suelos deben hacerse cimentaciones de gran profundidad que ayuden a soportar la capacidad de esfuerzo que recibe el suelo.

12 REFERENCIA

ABEM Manual de instrucción Terrameter LS. 2012. ABEM Product Number 33 3000 95, pp 1.

Alcaldía Municipal de Pamplona Norte de Santander. 2002. Plan de Ordenamiento Territorial Pamplona Norte de Santander. Pamplona - Colombia, pp. 36-40.

Álvarez B. Raúl, Barriga R. Lázaro, et al., 2004. estudio general de suelos y zonificación de tierras Departamento de Norte de Santander. Instituto Agustín Codazzi, pp. 28-30.

Braja M. Das, 1985. Fundamentos de la Ingeniería geotécnica, pp. 42.

Bunch, A., 1980. Crustal Development of the Reykjanes Ridge from Seismic Refraction. Journal of Geophysics. Vol. 47, pp. 261-264.

Carmona A. July E. 2014. Estudio de resultados ensayo de penetración estándar (spt) para el factor de corrección (cn) y el ángulo de fricción (ϕ) del suelo usando diferentes tipos de correlaciones, Trabajo de grado. Universidad católica de Colombia, pp. 30.

Dahlin, T., 2001. Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. Geophysical Prospecting, 48, pp. 181-187.

Delgado R. Jesús. R., 2011. Informe Geológico Ambiental Preliminar para el Área de Pamplona. Universidad de Pamplona, pp. 3-7.

Geometrics, 2010. ES-3000, GeodeTM y StrataVisorTM NZ/NZC Manual del Operador P/N 28519-01 Rev K. V. 8.18 SCS.

Geotomo Software., 2010. Rapid 2-D Resistivity IP inversion using the least-squares method. Wenner , dipole-dipole, inline pole-pole, pole-dipole, equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole, Wenner-Schlumberger, gradient and non-conventional arrays On land, water and cross-borehole surveys. Malaysia, pp. 1.

GARMIN Manual de usuario GPSMAP 64. 2016, pp. 1.

Gómez, J.C. 2014. Caracterización geoelectrica del subsuelo en el sector Floreña NW 6, Yopal-Casanare. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Geología. Bucaramanga Colombia, pp. 23.

Guariguata R. Gustavo J. 2008. Levantamiento sísmico de refracción somera en el área occidental de el hatillo, al norte del poblado de urumaco, estado falcón. Trabajo de grado. Universidad Simón Bolívar, pp. 11-13.

Gutiérrez P Kelly. D, Buitrago H. Leidy. G. 2016. caracterización geofísica del subsuelo mediante las técnicas de refracción sísmica reflexión sísmica MASW y REMI en depósitos superficiales y zonas críticas de la universidad de pamplona. Pamplona Colombia. Trabajo de grado. Universidad de Pamplona, pp. 130-131.

Jacoby, W. R., Wergel, W. y Fedorova, T., 2007. Crustal Structure of the Reykjanes Ridge near 62, on the basis of Seismic Refraction and Gravity Data. Journal of Geodynamics. Vol. 43, pp. 52-72.

Jarchow, C. M. y Thompson, G. A., 1989. The Nature of the Mohorovi Discontinuity. Planetary Sciences. N 17, pp. 475-506.

Lara Z.Rocio. 2012. Detección de zonas de riesgo en la ciudad de Guatemala. Trabajo de Grado. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 16.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010 Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente.

NSR-10. Bogotá D.C.: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, pp. A-22.

Oviedo, J. 2015. Geomorfología Tectónica del Sistema de Fallas del Zulia en el flanco Occidental del Sinclinal del Zulia, Norte de Santander-Colombia. Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias. Bogotá D.C, pp. 9.

Polanco, Abraham. 2012. Manual de prácticas de laboratorio de Mecánica de suelos I: Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Ingeniería, pp. 8-9.

Quintana B. Álvaro. R. 2013. Aplicación de la tomografía eléctrica en la Caracterización del Deslizamiento de Doña Mencía, Tesis de Master. Universidad de Granada, pp. 13-14.

Carmona A. July E. 2014. Estudio de resultados ensayo de penetración estándar (spt) para el factor de corrección (cn) y el ángulo de fricción (ϕ) del suelo usando diferentes tipos de correlaciones, Trabajo de grado. Universidad católica de Colombia, pp. 30.

Rodríguez B. Alexander, Cantillo N. Manuel E. 2006. Caracterización geotécnica de los suelos del campus de la Universidad de Pamplona y los barrios el Buque, Juan XXIII, Santa Marta, Tinto Redondo, Chichira y el Progreso en el Municipio de Pamplona, Norte de Santander. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander, pp. 4-6, 16-22.

SeisImager/SWTM, Manual, 2009. Versión 3.0, PickwinTM v. 4.0.1.5 WaveEqTM v. 2.3.0.8 GeoPlotTM v. 8.4.1.3

Servicio Geológico Colombiano. 2015. Atlas geológico de Colombia. Escala: 1:500.000. Bogotá D.C. Colombia.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C y Restrepo 1973. Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. U.S. Geological Survey e Ingeominas. Boletín Geológico, Vol. XXI (1-13), pp. 1-132.