

**CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA DEL SUELO (CASO DE  
ESTUDIO CABECERA DEL MUNICIPIO LOS SANTOS)**

**SEBASTIÁN SANMIGUEL HERNÁNDEZ  
JUAN PABLO MONTOYA LEÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2017**

**CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA DEL SUELO (CASO DE  
ESTUDIO CABECERA DEL MUNICIPIO LOS SANTOS)**

**SEBASTIÁN SANMIGUEL HERNÁNDEZ  
JUAN PABLO MONTOYA LEÓN**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director  
VLADIMIR MERCHÁN JAIMES  
Ingeniero Civil, MSc, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2017**

*Primeramente, quisiera agradecer a mis padres Jazmín y Oswaldo por siempre darme estudio con todo lo que esto conlleva y el apoyo al escoger lo que me gustaba, por el sacrificio que han hecho a través de todos estos años.*

*En segundo lugar, a mi tía María Teresa, gracias por darme todo sin ni siquiera pedir nada a cambio, más que mi propia felicidad y progreso en lo que llevo de vida.*

*En tercer lugar, a mi familia, ya que siempre estuvieron apoyándome y preguntando para cuando el título, siempre han sido de motivación para mí.*

*Finalmente quiero agradecer a mi compañero de proyecto Juan Pablo y a todos mis amigos, gracias por vivir conmigo esta experiencia, aprendí de cada persona que conocí y les deseo lo mejor de aquí en adelante, a esos que ya terminaron y a los que aún les falta.*

*A mi alma mater, a todos sus profesores y demás empleados, también a todas esas personas que trabajan y conviven en los alrededores de la universidad, todos ellos también hacen parte de nuestra comunidad y aportan también en este camino.*

*Sebastián Sanmiguel Hernández.*

*Gracias ante todo a Dios que me ha regalado la vida y las condiciones para estudiar y lograr este tipo de objetivos y me ha rodeado de las personas que a lo largo de estos años me han aportado.*

*A mi padre Gustavo, si hoy soy ingeniero se lo debo a él, a sus exigencias y a su ejemplo, espero algún día llegar a ser al menos la mitad del ser humano que es, no me alcanzará toda la vida para agradecerle tanto amor.*

*A mi mamá Elvira, por todo su cariño y amor, por darme aliento y expresarme su ternura cuando más lo necesitaba, las dificultades siempre existirán, pero su presencia y sus palabras siempre me ayudarán.*

*A mi madrastra Doris por contribuir con su esfuerzo para salir adelante en mi carrera, su figura maternal también me ha aportado en muchos aspectos de mi vida.*

*A mis hermanos, todos en la medida de sus particularidades son un ejemplo para mí, todos son personas responsables a quienes admiraré, respetaré y amaré siempre.*

*A mi primo José Manuel, mi otro hermano y con quien he tenido una relación estrecha y una amistad sincera, sé que cuento con él y él conmigo.*

*A Sebastián con quien alcanzamos esta meta y a todos mis otros amigos, siempre mantengo un grato recuerdo de cada uno y de los buenos momentos que compartimos.*

*Juan Pablo Montoya León.*

## CONTENIDO

	<b>Pág</b>
INTRODUCCIÓN .....	14
1. METODOLOGÍA .....	18
1.1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	18
1.1.1. Ventajas del ensayo.....	19
1.1.2. Limitaciones .....	19
1.2. SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO .....	20
1.3. DESARROLLO DE ENSAYOS DE CAMPO .....	20
2. MARCO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO .....	23
2.1. GEOLOGÍA REGIONAL.....	23
2.2. ENSAYOS DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT) .....	26
2.2.1. Estudio de suelos Urbanización El Tejar.....	26
2.2.2. Estudio de suelos Cancha y Cubierta municipio Los Santos .....	28
2.2.3. Estudio geotécnico en vereda El carrizal, municipio Los Santos .....	28
2.2.4. Estudio de suelos conjunto residencial campestre Tabacal Home Resort ..	29
2.2.5. Estudio geotécnico Casa de Campo Los Santos. ....	30
2.3. ANÁLISIS DE MUESTRAS DE LABORATORIO .....	31
3. ENSAYOS GEOFÍSICOS. ....	33
3.1 REFRACCIÓN SÍSMICA.....	35
3.2. MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW) .....	36
3.3. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.....	37
4. RESULTADOS DE CAMPO.....	40

4.1. REFRACCIÓN SÍSMICA.....	40
4.2. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.....	41
5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	42
6. CONCLUSIONES .....	48
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXOS .....	58

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág</b>
Figura 1. Metodología de trabajo para la investigación.....	18
Figura 2. Geófono .....	21
Figura 3. Equipos para ensayos de refracción sísmica.....	21
Figura 4. Conexión de electrodos para tomografía .....	22
Figura 5. Localización de La Mesa de Los Santos.....	23
Figura 6. Mapa geológico de La Mesa de Los Santos. ....	25
Figura 7. Localización de los sondeos SPT .....	27
Figura 8. Ilustración de ondas sísmicas .....	34
Figura 9. Dromocronas del ensayo de refracción sísmica .....	39
Figura 10. Perfil 2D de velocidades de onda P. ....	41
Figura 11. Perfil de resistividades reales del suelo. ....	41
Figura 12. Dispersión de datos de tomografía eléctrica.....	43
Figura 13. Valores de resistividad medida vs. Resistividad esperada. ....	43
Figura 14. Velocidades de onda P de línea sísmica vs. Valores N del estudio más cercano. ....	45

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág</b>
Tabla 1. Sondeos SPT Estudio Urbanización El Tejar.....	27
Tabla 2. Sondeos SPT Estudio Cancha y Cubierta .....	28
Tabla 3. Sondeos SPT Estudio vereda El Carrizal.....	29
Tabla 4. Sondeos SPT Estudio Tabacal Home Resort. ....	29
Tabla 5. Sondeos SPT Estudio Casa de Campo. ....	30
Tabla 6. Resultados de ensayos de corte directo .....	32
Tabla 7. Resultados de ensayos de Proctor Modificado. ....	32
Tabla 8. Rangos de Módulo de Poisson según la descripción del suelo .....	42
Tabla 9. Valores promedio de N y Vp para los lugares de estudio geotécnico .....	46

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág</b>
Anexo A. Interpolación velocidades de onda P de 0 m a 2 m con isolneas. ....	58
Anexo B. Interpolación velocidades de onda P de 2 m a 4 m con isolneas .....	59
Anexo C. Interpolación velocidades de onda P de 4 m a 6 m con isolneas. ....	60
Anexo D. Interpolación módulos de Young de 0 m a 2 m con isolneas .....	61
Anexo E. Interpolación módulos de Young de 2 m a 4 m con isolneas.....	62
Anexo F. Interpolación módulos de Young de 4 m a 6 m con isolneas.....	63
Anexo G. Perfil de velocidad de onda S obtenido por ensayo MASW.....	64
Anexo H. Módulos elásticos calculados para sitio de estudio El Tejar.....	65
Anexo I. Módulos elásticos calculados para sitio de estudio Cancha y Cubierta ..	68
Anexo J. Módulos elásticos calculados para sitio de estudio El Carrizal .....	71
Anexo K. Módulos elásticos calculados para sitio de estudio Tabacal Home Resort .....	74
Anexo L. Módulos elásticos calculados para sitio de estudio Casa de Campo.....	75
Anexo M. Módulos elásticos calculados para sitio de Línea Sísmica .....	78
Anexo N. Resumen de ensayos de laboratorio para muestras .....	80

## RESUMEN

**TÍTULO:** CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA DEL SUELO (CASO DE ESTUDIO CABECERA DEL MUNICIPIO LOS SANTOS)\*

**AUTORES:** SEBASTIÁN SANMIGUEL HERNÁNDEZ  
JUAN PABLO MONTOYA LEÓN\*\*

**PALABRAS CLAVE:** MÉTODOS GEOFÍSICOS, REFRACCIÓN SÍSMICA, ONDAS SÍSMICAS, CONSTANTES ELÁSTICAS, ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR.

### DESCRIPCIÓN:

Los métodos no destructivos de exploración de suelo están tomando un papel representativo en la práctica de distintos enfoques de la ingeniería debido a sus beneficios técnicos y económicos. Este trabajo presenta un estudio de campo de medición de parámetros geofísicos que conduzcan a resultados aproximados de algunas propiedades geotécnicas del suelo de la región de La Mesa de Los Santos y que además puedan ser confrontados con valores existentes provenientes de los ensayos geotécnicos tradicionales. Se realizó una revisión de literatura sobre teoría básica de métodos geofísicos, en particular la técnica de refracción sísmica y tomografía eléctrica, estudios previos de caracterización de suelos y correlación de ensayos geofísicos con propiedades geotécnicas. De manera resumida se transcriben los datos de los estudios geotécnicos, estos incluyen Ensayos de Penetración Estándar (SPT) y pruebas básicas de laboratorio para muestras obtenidas 'in situ'. Se presentan los resultados de las pruebas de campo realizadas: línea de refracción sísmica y dos pruebas complementarias como el MASW y tomografía eléctrica. Adicionalmente, se presenta el cálculo de las propiedades elásticas a partir de los datos de campo. Finalmente, se trabaja de forma preliminar e indicativa una correlación entre los datos de resultados del SPT con los obtenidos en la prueba geofísica.

---

\*Trabajo de grado.

\*\*Facultad de ingenierías Físico -mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Ing. MSc. PhD. Vladimir Merchán Jaimes. Codirector: Ing PhD Álvaro Viviescas

## ABSTRACT

**TITLE:** STATIC AND DYNAMIC CHARACTERIZATION OF SOIL (CASE STUDY HEAD OF THE MUNICIPALITY LOS SANTOS)\*

**AUTHORS:** SEBASTIÁN SANMIGUEL HERNÁNDEZ  
JUAN PABLO MONTOYA LEÓN\*\*

**KEYWORDS:** GEOPHYSICAL METHODS, SEISMIC REFRACTION, SEISMIC WAVES, ELASTIC CONSTANTS, STANDARD PENETRATION TEST

### DESCRIPTION:

Non-destructive methods of soil exploration are taking a significant role in different approaching of engineering because of their technical and economic benefits. This paper presents the results of a field study for the assessment of geophysical parameters that lead to approximate results of geotechnical properties of soil at La Mesa de Los Santos (Santander-Colombia) region and try to correlate such results with a traditional field test like Standard penetration test (SPT). It was carried out a literature review about basic theory of geophysical methods, seismic refraction and electrical imaging, previous studies of soil characterization and correlation of geophysical tests with geotechnical properties. In brief, the geotechnical studies data was transcribed, these included Standard Penetration Tests (SPT) and basic laboratory tests of obtained 'in situ' samples. Results of field tests are presented: seismic refraction line and two complementary tests like MASW and electrical tomography. Additionally, it is calculated the elastic properties from field data. Finally, a preliminary and indicative correlation is worked out between SPT results and geophysical tests results.

---

\*Bachelor Thesis.

\*\*Facultad de ingenierías Físico -mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Ing. MSc. PhD. Vladimir Merchán Jaimes. Codirector: Ing PhD Álvaro Viviescas

## INTRODUCCIÓN

La Mesa de los Santos (Santander), es una conocida zona de alta sismicidad situada en la cordillera oriental de Colombia, asociada al Nido Sísmico de Bucaramanga, que además está cercano a importantes sistemas de fallas que contribuyen como fuente de amenaza. De acuerdo con la Red Sismológica Nacional de Colombia, mensualmente se registran más de 120 sismos entre 3 y 6 de magnitud en la escala de Richter, que no generan consecuencias catastróficas puesto que se dan a una profundidad media de 150 km. A pesar de esta condición particular en términos sísmicos, la mesa de los santos se está convirtiendo en un polo de desarrollo de infraestructura. Teniendo en cuenta lo anterior, vale la pena estudiar y caracterizar los suelos residuales de esta zona que posiblemente estarán sujetos a solicitaciones ingenieriles.

En la práctica diaria de la ingeniería geotécnica, la caracterización del subsuelo se realiza desde los puntos de vista estático y dinámico, la parte dinámica se adelanta principalmente para estructuras que van a estar sometidas a cargas de este tipo, comúnmente maquinarias, cargas de viento y sismo [1]. Por otra parte, recientemente se están utilizando algunas de estas propiedades determinadas en condición dinámica, como el módulo de corte y el módulo de deformación para alimentar modelos constitutivos avanzados del suelo, que tienen en cuenta el comportamiento desde el nivel de muy pequeñas deformaciones hasta la rotura o falla de los materiales.

El ensayo de refracción sísmica es una herramienta útil para explorar en forma rápida y económica grandes áreas, permitiendo obtener con relativa precisión los espesores de los estratos y las velocidades de ondas  $P$ , y de ondas  $S$  en algunos casos con aplicaciones en geotecnia, minería y ciencias petroleras. Este método permite representar el perfil del subsuelo con resolución vertical relativamente cruda, ya que no es posible diferenciar capas delgadas [2]. De acuerdo con la teoría

de elasticidad, es posible relacionar las velocidades de propagación de ondas  $P$  ( $V_p$ ) y de ondas  $S$  ( $V_s$ ) y calcular los módulos elásticos del material a través de fórmulas [3]. El módulo de cortante ( $G$ ) tiene un especial interés en el diseño de fundaciones pues describe la rigidez del material, así como el módulo de Young ( $E$ ) y el módulo volumétrico ( $K$ ) que están asociados a la capacidad de soporte y la compresibilidad. Se realizó una tomografía eléctrica para complementar y observar características adicionales a las del primer ensayo. Si las condiciones son adecuadas es una herramienta muy potente para llevar a cabo correlaciones entre resistividad y tipo de material en terrenos ocultos [4].

Hay que anotar que, a principios del siglo XX, los parámetros elásticos obtenidos a partir de las velocidades mencionadas se creían relacionados exclusivamente al comportamiento dinámico y a muy pequeñas deformaciones. Del otro lado estaba la determinación de los parámetros “elásticos” a partir del ensayo triaxial convencional, llamados parámetros estáticos. La gran diferencia en magnitud de estos parámetros sugería pensar en dos marcos de referencia distintos y no conectados. No fue sino hasta finales de los años 80s del siglo XX, que se asociaron tales magnitudes a través de la curva de reducción del módulo y se entendió por parte de la comunidad geotécnica que la magnitud de los parámetros de deformación del suelo son una función del nivel de deformación asociado. Este efecto ha sido comprobado ampliamente desde el punto de vista experimental con el ensayo de columna resonante, el cual puede medir el módulo de corte desde niveles de 10-5 % hasta niveles de 10-2 % de deformación cortante. Por otra parte, el ensayo de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés) es ampliamente utilizado en los estudios geotécnicos quizá en muchas ocasiones de forma desmesurada para la estimación de parámetros de resistencia y de deformación. Por ejemplo [5] pone por escrito que se han usado tanto valor  $N$  sin corrección como con corrección para las correlaciones. En [6] también se analizan los efectos del tipo de suelo en la medición de velocidades de onda según su valor  $N$ . Para un caso más cercano en [7] se estudia la correlación de onda de corte con ensayo SPT para

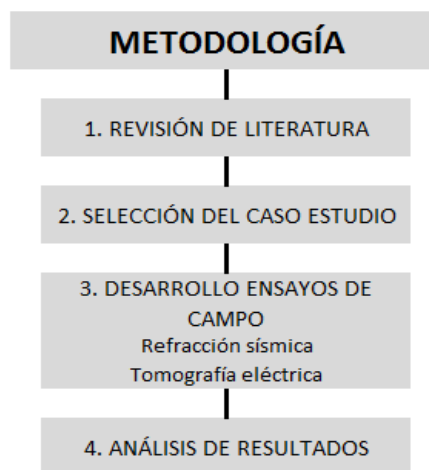
arcillas en la ciudad de Bogotá. Finalmente [6] y [8] recopilan una amplia cantidad de correlaciones entre estos dos valores.

Este trabajo busca evaluar y correlacionar la aplicación del ensayo de refracción sísmica como herramienta para valorar las capas del subsuelo y sus propiedades elásticas a partir de la revisión de fórmulas aplicadas en literatura especializada. Igualmente complementar los resultados obtenidos en el ensayo de refracción sísmica con la tomografía eléctrica, el ensayo MASW y las pruebas geotécnicas STP y de laboratorio de la región. Sin embargo, hay que anotar que en el caso del análisis de datos de velocidad con el número de golpes del SPT, es puramente indicativo.

# 1. METODOLOGÍA

Se desarrollaron las siguientes etapas mostradas en la Figura 1 para el desarrollo del siguiente trabajo, las cuales son descritas a continuación:

**Figura 1.** Metodología de trabajo para la investigación.



## 1.1. REVISIÓN DE LITERATURA

Se realizó una búsqueda de información con énfasis en las metodologías adoptadas en la aplicación del ensayo de refracción sísmica para la valoración del suelo y las diferentes características que se pueden saber a partir de este. De la investigación se obtuvo que el avance del ensayo va desde sus primeras aplicaciones hasta confirmar que puede ser utilizado como método para conocer el subsuelo de una forma eficiente y económica.

La búsqueda se desarrolló en las bases de datos Proquest y Science Direct. Los resultados fueron refinados sólo a revisiones de literatura y a artículos. Para el análisis de los documentos, se buscó identificar las estrategias para desarrollar

el ensayo, variables de mayor influencia, desempeño del ensayo, y las limitaciones que posee.

**1.1.1. Ventajas del ensayo.** A continuación, se encuentra una lista con las ventajas y capacidades con las que cuenta el ensayo de refracción sísmica:

Es un método geofísico indirecto por lo tanto no es destructivo.

- Es posible realizar los ensayos con terrenos con pendiente pronunciada.
- No requiere de equipos complejos o pesados, lo cual hace la operación más sencilla y rápida.
- La determinación de las ondas  $P$  es rápida y sencilla ya que son las primeras en llegar.
- Permite hacer una prospección de estratos a muy poca profundidad en tierra. Esto es difícil de lograr con métodos de reflexión [9].
- Es un método económico para el proyectista, pues abarca grandes extensiones de estudio en poco tiempo y se pueden tener un alcance preliminar, que será afinado con el informe final [9].

**1.1.2. Limitaciones.**

- Para que el ensayo se desarrolle correctamente las velocidades de onda  $P$  deben aumentar a medida que aumenta la profundidad. La longitud del tendido es directamente proporcional a su profundidad.
- Para obtener registros sísmicos de mejor calidad es necesario utilizar explosivos lo que implica realizar perforaciones en el suelo.
  - Sólo permite diferenciar las capas del subsuelo que presenten mayor contraste de velocidad y mayor espesor. En el caso de suelos con capas intermedias de menor velocidad el método no las visualizará, este fenómeno se llama inversión de onda [9].
- Para la energía de la fuente normalmente utilizada, los parámetros son buenos hasta unos 40m de profundidad. Se requieren fuentes especiales para mejorar el análisis en profundidad.

## **1.2. SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO**

La localización del caso estudio fue seleccionada dada la gran cantidad de sismos anuales que se presentan en el área de la Mesa de los Santos, Santander. Por este motivo se quiso realizar el estudio y así dejar consignado el resultado de las propiedades elásticas de los suelos de la zona.

## **1.3 DESARROLLO DE ENSAYOS DE CAMPO**

Primeramente, en el procedimiento de campo se seleccionó la ubicación del perfil el cual se iba a trabajar, posteriormente se tendió el cable de refracción que une los geófonos (ver Figura 2) con el sismógrafo. Los geófonos se enterraron equidistantemente cada 4 [m] para una longitud total del 92 [m] (Se trabajo para este ensayo de refracción sísmica con 24 geófonos). A continuación, se dispone a conectar los geófonos con el cable de refracción y este último al sismógrafo (ver Figura 3), al que también se le es conectado la fuente de impacto del ensayo. Finalmente se conecta el sismógrafo a un computador el cual va a ser la base de datos del ensayo y donde se registraron los datos de refracción (se recomienda hacer varios impactos preliminares para saber si el circuito quedo bien conectado). Se utilizo una porra a la cual se le conecta un sensor para que registre el instante cero en el cual es generado el impacto, estos impactos se realizan sobre una placa metálica que se colocó a una distancia de 1 [m] de los geófonos.

**Figura 2.** Geófono.



**Figura 3.** Equipos para ensayos de refracción sísmica.



Para desarrollar el ensayo se ubica la placa metálica al costado de los geófonos, las ubicaciones de esta son al principio de la línea (geófono inicial ó 0) a mitad de la línea (en medio de los geófonos 12 y 13) y al final de la línea (geófono 24), realizando el número de golpes configurado para el ensayo. De esta manera concluye la obtención de datos de campo.

Al igual que en la refracción sísmica en la tomografía inicialmente se escoge la ubicación del perfil en el cual se va a trabajar (se establece la ubicación paralela a 3 [m] de la ubicación de la línea de refracción sísmica). Se deben definir cuál es el

origen y final del perfil a fin de no tener problemas en la fase de interpretación. Se intentará además que la topografía del terreno sea lo más plana posible para evitar tener fenómenos anómalos en las medidas de resistividad. En el caso que esto sea inevitable, el software permite minimizar este fenómeno mediante el ajuste de la malla [10].

Los electrodos (ver Figura 4) se enterraron equidistantemente cada 2 [m] para una longitud total del 110 [m] (Se trabajó la tomografía eléctrica con 56 electrodos), estos deben quedar bien enterrados para garantizar un buen contacto con el suelo. A continuación, se dispone a conectar los electrodos con el cable de conexión y este último al equipo de medición.

**Figura 4.** Conexión de electrodos para tomografía.



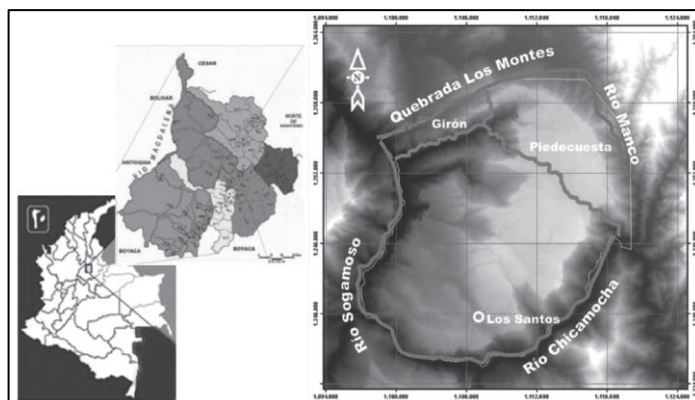
Se configuran todas las variables del dispositivo: número de electrodos utilizados, distancia entre ellos, dispositivo electrónico de medida, así como el número de medidas que se realizarán. Antes de iniciar las mediciones y también mediante la unidad central, se procede previamente a la verificación de que todas las conexiones funcionan correctamente, y que la resistividad entre electrodo-suelo es suficientemente baja como garantizar unos buenos resultados [10]. Una vez terminado todo el proceso de captura de datos, toda la información almacenada digitalmente se vuelca en el portátil, a fin de proceder a su procesamiento e interpretación.

## 2. MARCO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO

### 2.1. GEOLOGÍA REGIONAL

La Mesa de Los Santos es un área geográfica con una topografía entre plana y levemente inclinada en el costado occidental de la Cordillera Oriental comprendida en su mayoría en la jurisdicción del municipio de Los Santos y su parte restante del municipio de Piedecuesta en el departamento de Santander (ver Figura 5). Estructuralmente la región está cercana a tres importantes fallas: Falla Bucaramanga al este, Falla del Suárez al Oeste y Falla Los Montes al norte.

**Figura 5.** Localización de La Mesa de los Santos.



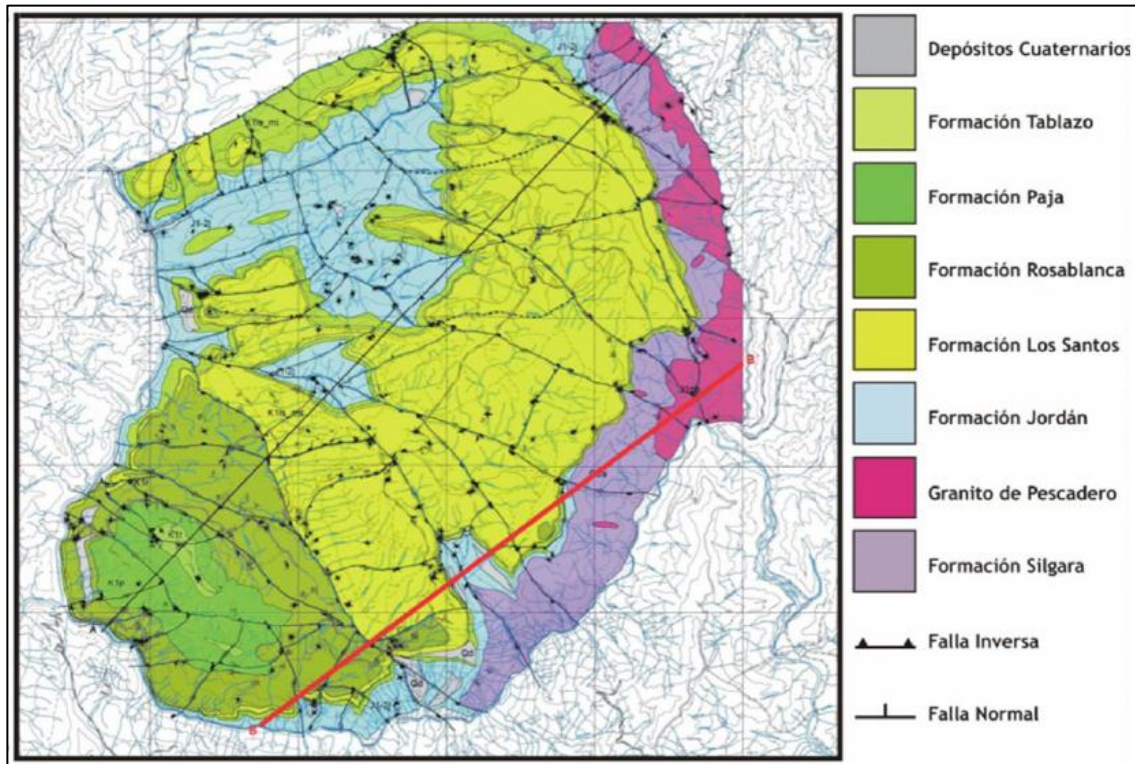
**Fuente.** Estudio Geológico Enfocado A La Caracterización Paisajística De La Mesa De Los Santos, Santander, Colombia. Gómez Gómez J. D. y Cuervo Silva R. G.

La geología de La Mesa de Los Santos consta de varias unidades estratigráficas como se puede observar en el mapa geológico (ver Figura 6), destaca entre estas la Formación Los Santos que subyace el suelo del lugar en donde se llevó a cabo la línea sísmica. La Formación Jordán es Subyacente a la Formación Los Santos en la mayoría de la extensión del área de estudio. Cabe anotar que pueden encontrarse mapas geológicos que contengan Formación Tambor en lugar de Formación Los Santos y que esta última se adoptó por varios autores debido a las

diferencias existentes con la Formación Tambor de la localidad tipo en el Río Lebrija [11].

La Formación Jordán es subyacente de la Formación Los Santos y está conformada por alternancias entre capas de arenisca de grano muy fino y fino con matriz limo-arcillosa, arcillolitas y limolitas;(ver Figura 6) además dos columnas estratigráficas (La Punta y Carrizal) caracterizan la formación Los Santos al noreste y este de La Mesa, los miembros superiores con espesores de 48,7 m y 33 m para La Punta y Carrizal respectivamente presentan capas de areniscas de grano medio y alternancias de areniscas de grano fino y medio con algunas capas de areniscas de grano grueso y limolitas [12]. Por su parte las secciones El Calicho (miembro superior 95,3 m) y La Navarra (miembro superior 54 m), al oeste y norte de La Mesa respectivamente, contienen capas de cuarzoarenitas de grano fino y muy fino, limolitas de cuarzo, arcillolitas y areniscas de grano fino, medio y muy fino [11]. En [11] y [12] se pueden encontrar las columnas estratigráficas.

**Figura 6.** Mapa Geológico de La Mesa de Los Santos



**Fuente.** Evaluación Hidrogeológica Preliminar De Las Unidades Geológicas De La Mesa De Los Santos, Santander. Díaz E. J., Contreras N. M., Pinto J. E., Velandia F., Morales C. J., e Hincapié G.

Según el Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio los suelos presentan un índice alto de aridez entre los más altos de Santander, entre las características allí mencionadas se encuentran una precipitación anual menor a 1200 mm y una alta insolación anual, ambas influidas por un fenómeno de sombra pluviométrica por barreras geográficas y condensación nula a causa de un proceso de no reciclaje de la humedad. La alta aridez está sujeta además a una alta evapotranspiración que no es bien compensada, todo lo anterior explica la deficiencia de agua en la zona. La amplia actividad sísmica está asociada al Nido sísmico de Bucaramanga y son varios los autores que intentan explicar los fenómenos tectónicos de Nido,

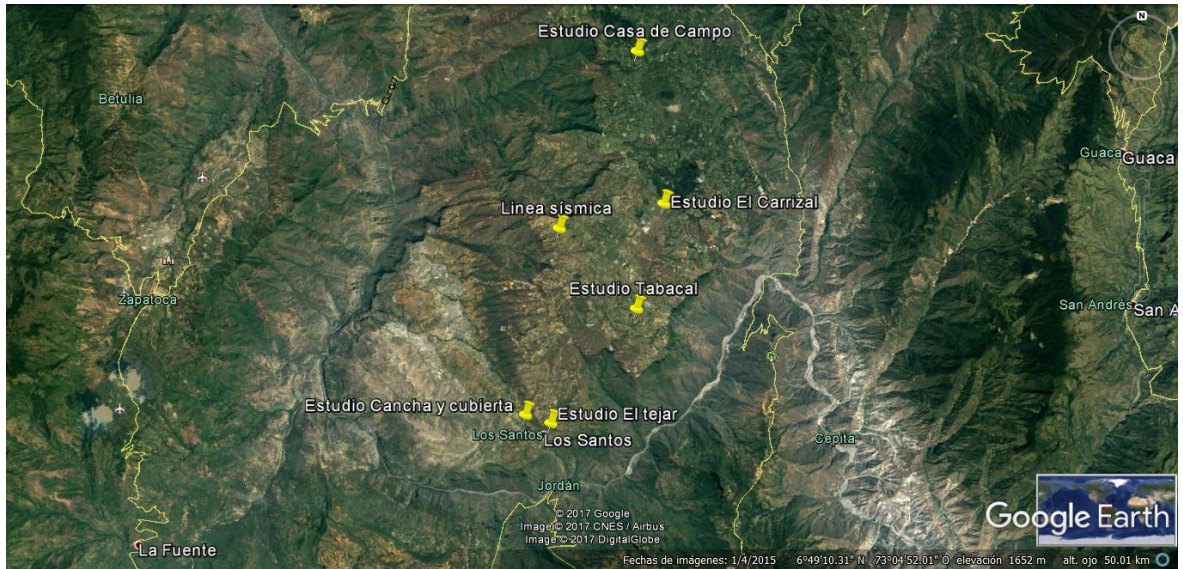
refiriéndose a fenómenos como subducción y colisión de placas, interacción de esfuerzos e inestabilidades térmicas que conducen a zonas de cizalla [13].

## **2.2. ENSAYOS DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)**

Los ensayos SPT se realizan con martillos de 140 libras a una altura de caída de 30 pulgadas, para cada tramo se realizan tres intervalos de 15 centímetros (6 pulgadas) y se toma un N de diseño equivalente a la suma de los N de las 12 pulgadas finales. El valor N en los estudios geotécnicos está sujeto a correcciones por diferentes factores para llegar a un N corregido, para efectos de correlación en el presente estudio es indiferente tomar el valor N o N corregido según como se presente en los datos recopilados, basándose en las conclusiones a las que han llegado diversos autores. A continuación, se presentan de manera resumida resultados obtenidos en algunos estudios geotécnicos llevado a cabo en La Mesa (ver Figura 7) por parte de algunas empresas dedicadas a la exploración de suelos, en total se muestran 22 sondeos SPT y pruebas de laboratorio para numerosas muestras recolectadas.

**2.2.1. Estudio de suelos Urbanización El Tejar.** Realizado por Andina Ingeniería S.A.S. en mayo de 2016 para una urbanización de unidades constructivas de categoría baja, compuesta por casas bi-familiares y locales comerciales en sistema estructural de pórticos con zapatas aisladas o combinadas a 2 m de profundidad unidas por vigas de amarre (ver Tabla 1).

**Figura 7. Localización de sondeos SPT**



**Tabla 1. Sondeos SPT Estudio Urbanización El Tejar**

Profundidad (m)		N						
0	a	0,5	12	15	19	12	16	10
0,5	a	1	21	25	28	11	26	15
1	a	1,5	30	30	37	24	37	8
1,5	a	2	35	39	44	32	42	8
2	a	2,5	39	45	50	37	47	7
2,5	a	3	44	50	56	44	54	6
3	a	3,5	50	54	68	48	63	29
3,5	a	4	55	65	R	55	70	38
4	a	4,5	65	R		R	R	45
4,5	a	5	R					65

5	a	5,5				R
---	---	-----	--	--	--	---

**Fuente.** Andina Ingeniería S.A.S

**2.2.2. Estudio de suelos Cancha y Cubierta municipio Los Santos.** Llevado a cabo por ConstruSuelos de Colombia S.A.S. en marzo de 2014 con un total de cuatro sondeos SPT, recomiendan cimentación superficial con zapatas aisladas a 1,5 m de profundidad (ver Tabla 2).

**Tabla 2.** Sondeos SPT Estudio Cancha y Cubierta

Profundidad (m)			N			
0	a	0,5	36	12	34	9
0,5	a	1	58	18	18	10
1	a	1,5	57	9	R	23
1,5	a	2	40	R		R
2	a	2,5	R			

**Fuente.** ConstruSuelos de Colombia S.A.S.

**2.2.3. Estudio geotécnico en vereda El Carrizal, municipio Los Santos.**

Ejecutado en marzo de 2015 en el área destinada para la construcción de tres cabañas y un centro de convenciones, después de los respectivos sondeos y análisis se aconsejó el uso de zapatas aisladas a 1,5 m conectadas por vigas de amarre (ver Tabla 3).

**Tabla 3.** Sondeos SPT Estudio vereda El Carrizal

Profundidad (m)			N					
0	a	0,5	14	19	26	39	42	
0,5	a	1	31	19	31	18	24	
1	a	1,5	30	24	39	26	22	
1,5	a	2	65	37	65	37	45	
2	a	2,5	R	63	R	48	44	
2,5	a	3		R		R	R	

**Fuente.** IngeoExploraciones S.A.S.

#### 2.2.4. Estudio de suelos conjunto residencial campestre Tabacal Home Resort.

Para un proyecto previsto de 64 unidades residenciales de dos y tres pisos y algunas comerciales y comunitarias en un área de casi 10000  $m^2$  con profundidades de cimentación recomendadas desde 2 hasta 6 m. En total se hicieron seis sondeos (ver Tabla 4).

**Tabla 4.** Sondeos SPT Estudio Tabacal Home Resort

Profundidad (m)			N					
0	a	0,5	10	11	9	11	11	8
0,5	a	1	5	17	17	14	12	17
1	a	1,5	4	13	22	9	14	20
1,5	a	2	3	5	23	7	13	20

2	a	2,5	3	3	23	8	14	25
2,5	a	3	3	11	23	14	18	22
3	a	3,5	9	15	20	18	22	22
3,5	a	4	19	12	22	14	18	21
4	a	4,5	14	14	27	17	20	26
4,5	a	5	15	20	28	33	27	28
5	a	5,5	21	23	29	25	23	29
5,5	a	6	21	21	27	27	24	25

**Fuente.** JC Laboratorios y Geotecnia S.A.S.

**2.2.5. Estudio geotécnico Casa de Campo Los Santos.** Se cuenta con un último perfil y el que alcanza mayor profundidad (12 m) de Ingeniería & Suelos S.A.S. en agosto de 2014. En este se encontraron dos franjas con bloques de Roca.

**Tabla 5.** Sondeos SPT Estudio Casa de Campo

Profundidad (m)		N		Profundidad (m)		N	
0	a	0,5	14	6	a	6,5	24
0,5	a	1	17	6,5	a	7	42
1	a	1,5	26	7	a	7,5	Rocas
1,5	a	2	35	7,5	a	8	Rocas
2	a	2,5	26	8	a	8,5	Rocas
2,5	a	3	35	8,5	a	9	Rocas

3	a	3,5	21	9	a	9,5	Rocas
3,5	a	4	37	9,5	a	10	Rocas
4	a	4,5	Rocas	10	a	10,5	Rocas
4,5	a	5	Rocas	10,5	a	11	43
5	a	5,5	Rocas	11	a	11,5	95
5,5	a	6	Rocas	11,5	a	12	72

**Fuente.** Ingeniería & Suelos S.A.S.

### 2.3. ANÁLISIS DE MUESTRAS EN LABORATORIO

En los estudios geotécnicos se reunieron un total de 36 muestras estudiadas en laboratorio a las cuales se hicieron ensayos:

- Granulometría (NTC 77/ASTM D421-58)
- Contenido de humedad (NTC 1495/ASTM D2216)
- Límite plástico e Índice de plasticidad (NTC 1493/ASTM D4318)
- Límite líquido (NTC 1494/ASTM D4318)
- Clasificación de suelos (NTC 1504/ASTM D2487)

Es evidente en los resultados de la tabla el predominio de arenas en su mayoría con contenido limoso y algunas pocas muestras de arcilla con valores de humedad de amplia variabilidad y rango. Por otra parte, varias de las pruebas en el laboratorio no presentaban informes de límites líquido, plástico o índice de plasticidad generando cierta incertidumbre en la clasificación de los materiales. Dentro de las muestras, algunas se sometieron a una prueba de peso unitario por método de flotación y se llegó a un valor promedio de 2,08 g/cm<sup>3</sup>, convirtiendo las unidades resulta en un valor cercano a 20 KN/m<sup>3</sup> que se tomó como referencia.

Por último, se cuenta con otros valores poco representativos respecto del número total de muestras contenidos en los estudios de suelos son dos ensayos de corte directo y dos ensayos Proctor modificado (ver Tabla 6 y Tabla 7) de muestras en el primer metro de profundidad.

**Tabla 6.** Resultados de ensayos de corte directo

<b>Ángulo de fricción interna (<math>\phi</math>)</b>	<b>Cohesión (kg/m<sup>2</sup>)</b>
32	4400
24,7	1619,1

**Fuente.** Andina Ingeniería S.A.S., IngeoExploraciones S.A.S

**Tabla 7.** Resultados de ensayos de Proctor Modificado

<b>Densidad seca máxima (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Humedad óptima de compactación (%)</b>
2030	13
2010	13

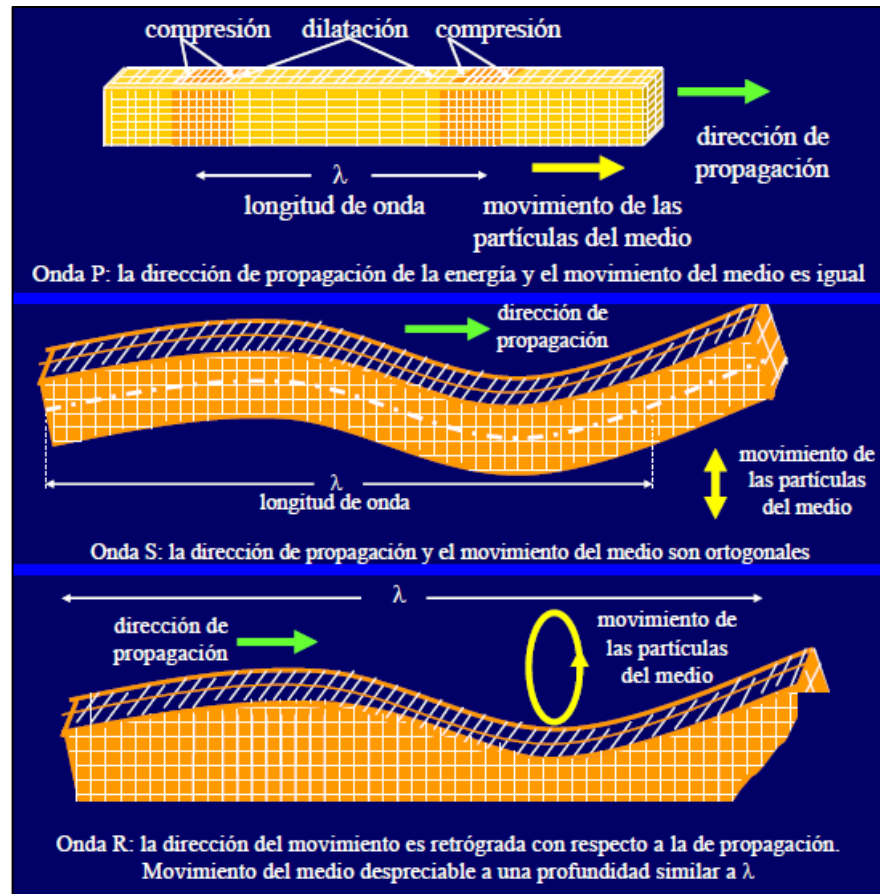
**Fuente.** Andina Ingeniería S.A.S.

### 3. ENSAYOS GEOFÍSICOS

Como se explica en [14] la combinación de métodos geofísicos con ensayos 'in situ' resulta benéfico en el estudio de las propiedades de los suelos, la investigación geofísica proporciona información general de masas de suelo y roca a diferencia de las pruebas geotécnicas que tienen un enfoque local de características puntuales de la masa y no de la masa como un todo.

Los fenómenos de propagación ondulatoria en el suelo son producto de generación del incremento de esfuerzos a través del medio que para efectos de estudio se asume como un comportamiento elástico. En general existen dos tipos de ondas, internas y superficiales (ver Figura 8), dentro de las primeras se encuentran las compresionales (Onda *P*) y las de cortante (Onda *S*). Las ondas superficiales se componen de: ondas de Rayleigh (Ondas *R*) y ondas Love (Ondas *L*). La característica más importante de las ondas sísmicas es su velocidad, pues es a partir de esta que se pueden calcular propiedades deformacionales de gran importancia para los estudios geotécnicos.

**Figura 8.** Ilustración de Ondas sísmicas



**Fuente.** Investigación no destructiva y cargas extremas en estructuras. Sarria Molina A.

Estas propiedades son el módulo de deformación (E) que se define en función de la densidad del medio y de la velocidad de onda de compresión ( $V_p$ ). También se puede definir el módulo de corte (G), en función de la densidad y la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ). Estos módulos corresponden a los valores máximos a muy pequeñas deformaciones.

La resistividad eléctrica del suelo también es comúnmente estudiada para evaluar su dependencia de ciertos factores, entre estos la presencia de agua subterránea es tal vez el más frecuente que de manera indirecta representa un indicativo del

grado de porosidad, y por consiguiente saturación, de los materiales. A partir de esto en [14] se intuye una tendencia general entre la porosidad y la resistencia a la compresión de los materiales o cómo el contenido de agua condiciona la resistencia al cortante de suelos finos.

### **3.1. REFRACCIÓN SÍSMICA**

La refracción sísmica es un método geofísico no destructivo para la interpretación de las propiedades de los suelos, y la detección de la profundidad de la roca, mediante el análisis de las variaciones en las velocidades propagadas en el suelo.

Este método también permite determinar los módulos elásticos de los diferentes estratos del suelo en caso de que exista más de uno, a partir de diferentes ecuaciones basadas en las velocidades de onda generadas por estos mismos.

La técnica de refracción consiste en la medición de los tiempos de viaje de las ondas compresionales (ondas  $P$ ), y algunas veces de las ondas de corte (ondas  $S$ ), generada por una fuente de energía impulsiva a unos puntos localizados a distancias conocidas a lo largo de un eje sobre la superficie del suelo. La energía es detectada, amplificada, y registrada de tal manera que puede determinarse su tiempo de arribo en cada punto [2].

El instante del impacto o explosión, "tiempo cero", también es registrado juntamente con las vibraciones del suelo que arriban de los geófonos. Por lo tanto, en general, los datos consisten en tiempos de viaje y distancias, siendo el tiempo de viaje el intervalo entre el "tiempo cero" y el instante en que el geófono empieza a responder a la perturbación [2].

La refracción que sufre el impulso sísmico al pasar de un material a otro depende de la relación de las velocidades de transmisión de los dos materiales. La ley fundamental que describe la refracción de los rayos de luz es la Ley de Snell. Si las velocidades de las capas aumentan con la profundidad, una parte de la energía será eventualmente refractada de nuevo a la superficie donde puede ser detectada [15].

La refracción sísmica permite reconstruir un perfil bidimensional de ondas P ( $V_p$ ) en función de la profundidad a lo largo de la línea de geófonos. Estas velocidades están controladas por los parámetros elásticos que describen el material y pueden correlacionarse con numerosas propiedades geomecánicas [9].

### **3.2. MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW)**

El método MASW es una técnica igualmente no destructiva (no se generan perturbaciones importantes a la estructura del medio analizado) que permite determinar el perfil de velocidad de onda cortante del suelo, midiendo el movimiento de la onda sobre la superficie del suelo [16]. Las ondas superficiales se propagan horizontalmente a través de la superficie de medición desde el punto de impacto hasta los receptores (geófonos).

La mayor contribución al movimiento superficial de la onda esta dado por las ondas tipo Rayleigh, las cuales viajan a una velocidad que es estrictamente relacionada con la rigidez de la región del suelo donde se produce la propagación [16]. El método MASW utiliza un sistema de registro multicanal para estimar la velocidad de la onda S cerca de la superficie, utilizando los registros de ondas Rayleigh de alta frecuencia. Esta técnica consiste en:

- La adquisición de ondas superficiales de alta frecuencia (Ondas  $R$ ) utilizando un sistema de registro multicanal.

- Creación de algoritmos organizados, eficaces y precisos en una sencilla secuencia de procesamiento de datos diseñada para extraer y analizar la curva de dispersión de la onda Rayleigh.
- El desarrollo de algoritmos de inversión estables y eficientes para obtener los perfiles de la velocidad de la onda S [16].

La energía de la onda superficial decae exponencialmente con la profundidad debajo de la superficie. La energía o amplitud de cualquier frecuencia particular depende de la relación entre la profundidad y la longitud de onda. Así, para cada frecuencia, la amplitud disminuye por el mismo factor cuando la profundidad aumenta por una longitud de onda. La onda de frecuencia más alta corresponde a la velocidad de la capa más superficial, y la onda de frecuencia más baja corresponde a la velocidad de la capa más profunda, en general [17].

MASW utiliza la propiedad dependiente de la frecuencia de la velocidad de onda superficial, o la propiedad de dispersión, para el perfilado de Vs. Analiza el contenido de frecuencia en los datos registrados de una matriz de geófonos desplegados a una distancia moderada. El principio MASW es emplear y disponer una serie de sensores en la superficie del suelo para capturar ondas propagadoras de Rayleigh, que dominan dos tercios de la energía sísmica total generada por las fuentes de impacto [17]. El módulo de cortante está directamente vinculado con la rigidez del material, siendo uno de los parámetros más críticos de la ingeniería. Sísmicamente la velocidad de onda cortante (Vs) es el mejor indicador de este [18].

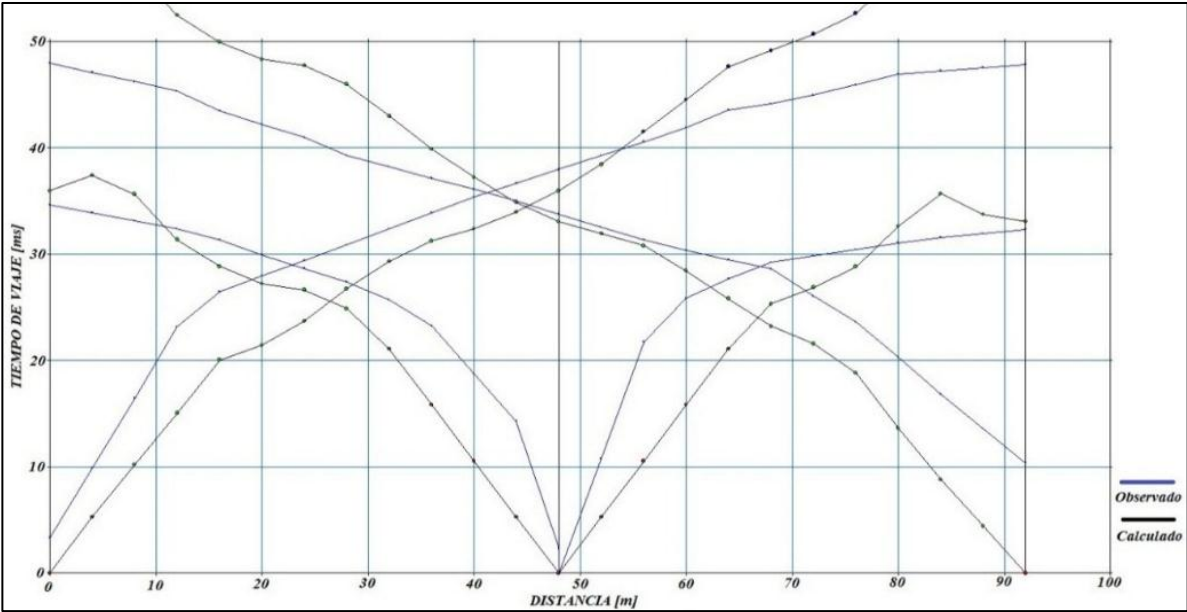
### **3.3. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA**

La Tomografía eléctrica es un método de resistividad multielectródico, se mide la resistividad en numerosos puntos de un perfil y se interpolan e interpretan los datos para hacer corte de resistividad del terreno. En el cual el proceso de toma de datos está totalmente automatizado, permitiendo tomar varias medidas en un breve

espacio de tiempo. La finalidad de los estudios o campañas de prospección eléctrica es determinar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo a partir de medidas efectuadas desde la superficie. A partir de estas medidas se puede estimar la estructura y resistividad eléctrica verdadera del subsuelo. Esta resistividad eléctrica se relaciona con varios parámetros geológicos tales como el contenido en fluidos, la porosidad y el grado de saturación en agua de la formación [19].

Este método obtiene una sección 2-D de resistividades reales del subsuelo, modelo a partir del cual podremos determinar la presencia o no de filtraciones de agua en profundidad, mediante la localización de áreas en donde tengamos una disminución anómala del valor de la resistividad del terreno [10]. Para ello será preciso el empleo de un programa de inversión, con el que transformamos las resistividades aparentes obtenidas de la campaña de campo, a valores de resistividad real [10]. En la aplicación de los métodos eléctricos, la principal premisa a cumplir es la existencia de contraste de resistividades entre los materiales o estratos que se investigan. Si se dan las condiciones teóricas básicas, es posible detectar diferencias de conductividad geoelectrica que permiten elaborar cartografías de apoyo geológico y columnas estratigráficas. Cuanto mayor sea el contraste de resistividades (o el opuesto de conductividades) de los materiales, mayor será la resolución [4].

Figura 9. Dromocronas del ensayo de refracción sísmica

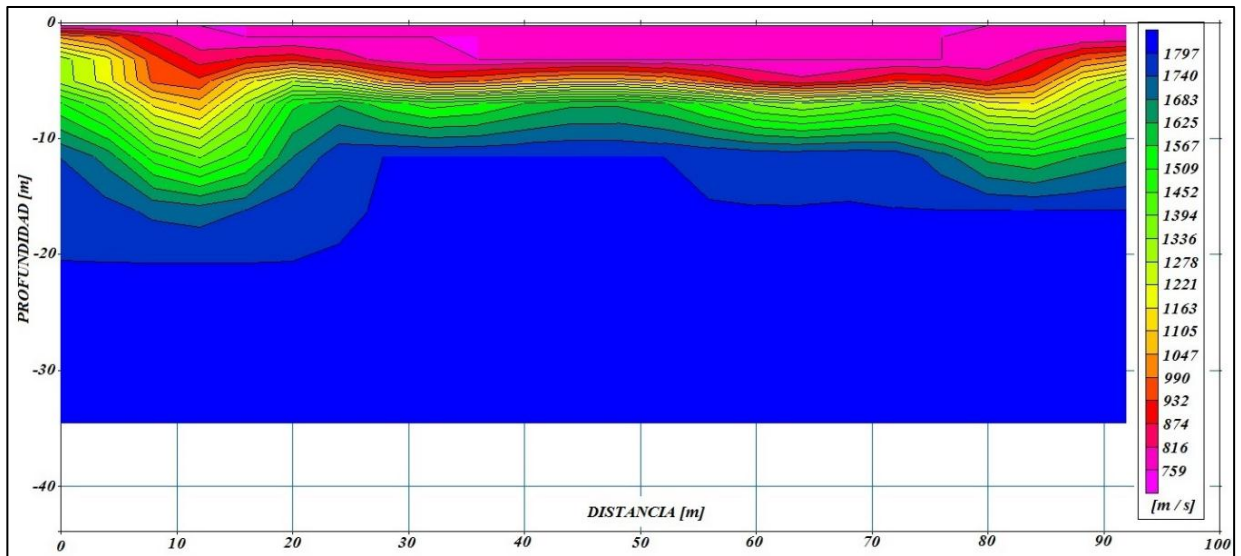


## 4. RESULTADOS DE CAMPO

### 4.1. REFRACCIÓN SÍSMICA

De acuerdo con [6] la resolución de los ensayos aumenta con el número de canales utilizados en la línea sísmica siempre y cuando también la longitud de esta incremente. En teoría la profundidad de exploración es aproximadamente la tercera parte de la longitud del tendido y más allá de esta medida los resultados no son confiables. Una vez realizado el ensayo de campo se procede a realizar el análisis de los datos obtenidos, se toman los 3 archivos (.dat) generados por el sismógrafo (uno por cada lugar en donde se realizó los impactos; inicio, medio y final de la línea) y se introducen en el programa PICKWIN, este programa realiza la identificación del tiempo de llegada de las primeras ondas a cada sismógrafo y de allí genera una línea que representa la velocidad de onda de refracción. La unión de estas 3 líneas de velocidad se conoce como dromocrona, en la Figura 9 se presentan los resultados de la prueba realizada en la Mesa de los Santos. Los resultados generados por el programa PICKWIN son importados al software PLOTREFA el cual realiza una inversión de datos del dromocrona, generando de esta manera un perfil de velocidades de onda compresionales (ver Figura 10).

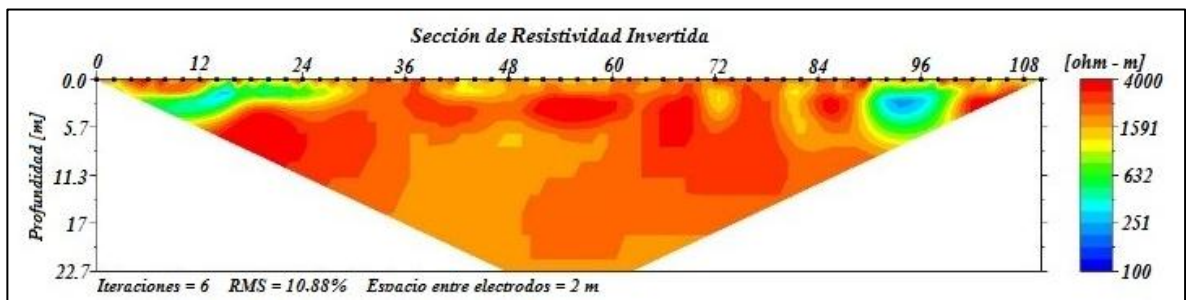
**Figura 10.** Perfil 2D de velocidades de onda P



## 4.2. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

Después de realizar la inversión de los datos se obtiene el perfil de resistividades reales (luego de 6 iteraciones) obtenido en el ensayo de tomografía eléctrica (ver Figura 11). También se generaron los perfiles de porcentaje de error producidos en el ensayo (ver Figura 12) y por último la comparación de la resistividad pronosticada con la aparente medida, mostrando que gran parte de los valores se encuentran próximos a la regresión lo cual explica el bajo porcentaje de error (ver Figura 13).

**Figura 11.** Perfil de resistividades reales del suelo.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los ensayos geotécnicos de exploración tienen un patrón común de profundidad sondeada, salvo la excepción del último perfil la mayoría alcanzan una profundidad máxima de 6 m, algunos alcanzando el rechazo, tal y como establece el Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente NSR10 en el título H y en general a causa de las características de las construcciones de la región que raramente superan los dos pisos.

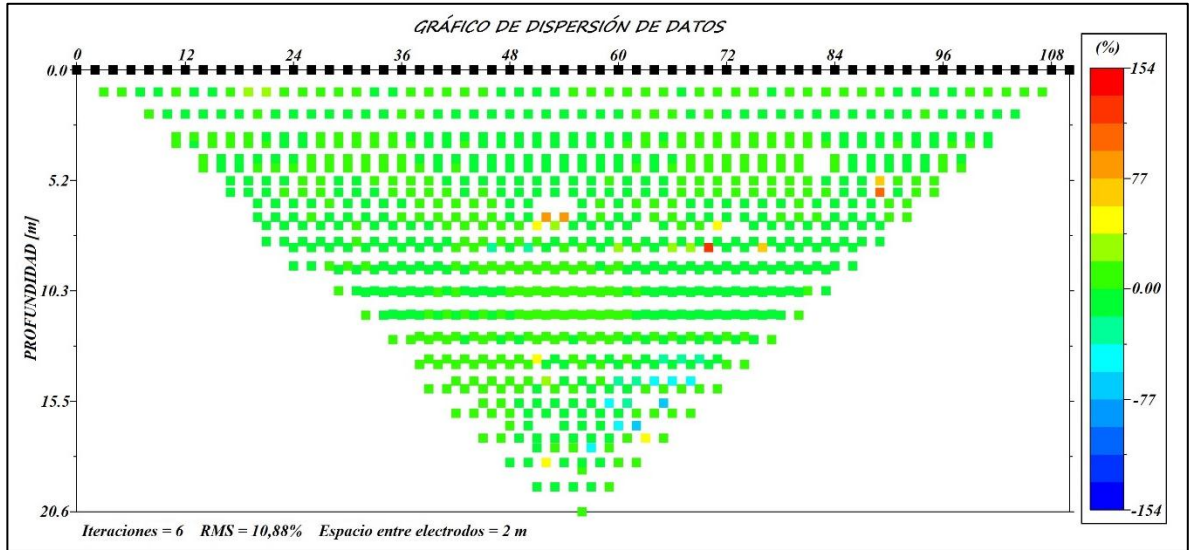
En general para [14] las masas de roca tienen una relación de Poisson ( $\sigma$ ) promedio de 0,25 sin embargo en las masas de suelo es más complejo dada una “temprana no linealidad” de la relación esfuerzo-deformación, aun así, advierte que debe ser menor a 0,5 para cumplir la teoría de elasticidad. También [20] sugiere un rango de valores de 0,2 a 0,5 en el valor de Poisson. [21] recopila algunos resultados y observaciones de autores respecto de la relación de Poisson: valor de 0,31 para sedimentos no consolidados e insaturados, valores negativos de la relación indican saturación de aire o gases, relación inversa entre la compresibilidad (módulo volumétrico) y  $\sigma$  y valores muy cercanos a 0,5 en arcillas, en condiciones no drenadas (a corto plazo). Por último, [22] establecen algunos rangos de acuerdo con la descripción del suelo como se observa en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Rangos de Módulo de Poisson según la descripción del suelo

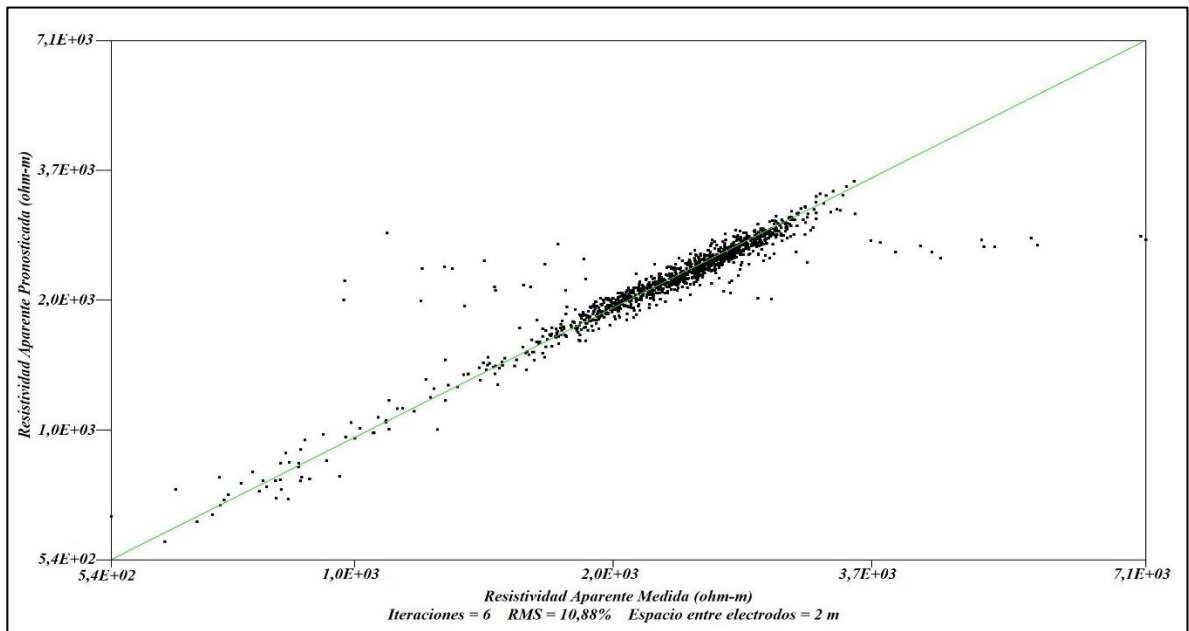
<b>Descripción del suelo</b>	<b>Relación de Poisson</b>
Incompetente a ligeramente competente	0,49 - 0,41
Tolerablemente a moderadamente competente	0,35 - 0,27
Competente	0,25 - 0,16

**Fuente.** Engineering applications of seismic refraction method: A field example at Wadi Wardan, Northeast Gulf of Suez, Sinai, Egypt. Khalil M.H. y Hanafy S.M.

**Figura 12.** Dispersión de datos de tomografía eléctrica.



**Figura 13.** Valores de resistividad medida vs. resistividad esperada.



Se tomaron valores promedio de onda P dentro del rango de profundidades superficiales (6 m) para tres capas aproximadas de 2 m y los valores por debajo de esta profundidad en un rango específico de 0,25 a 0,35 en el módulo de Poisson ( $\sigma$ ) para calcular primeramente las velocidades de onda cortante y luego las constantes con las ecuaciones de la teoría de elasticidad, tomadas de [22] y [23].

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{(Vp/Vs)^2 - 1} \right] \quad (1)$$

$$E = \rho \left[ \frac{3Vp^2 - 4Vs^2}{(Vp/Vs)^2 - 1} \right] \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \sigma)} \quad (3)$$

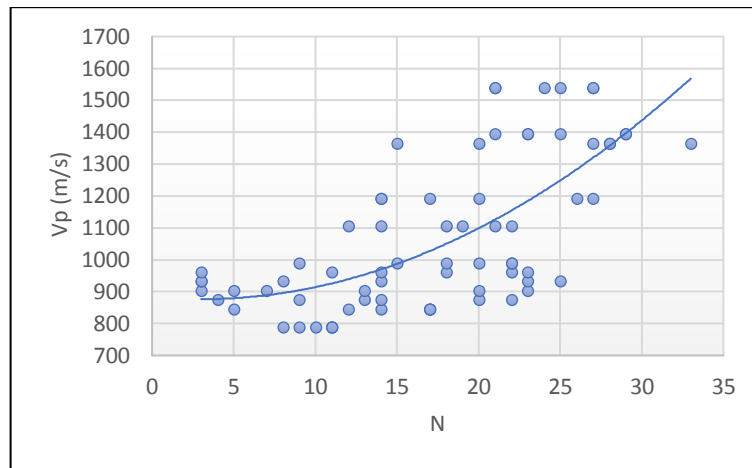
$$K = \frac{2G(1 + \sigma)}{3(1 - 2\sigma)} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)} \quad (5)$$

A partir de la regresión (ver Figura 14) se obtuvo la correlación (ecuación 6) entre valores de onda P y valores N tomó los datos de la línea sísmica y el estudio geotécnico más cercano. A partir de esta se calcularon los valores promedio en tres capas (ver Tabla 9).

$$Vp = 0,7686x^2 - 4,6143x + 883,59 \quad (6)$$

**Figura 14.** Velocidades de onda P de línea sísmica vs. Valores N del estudio más cercano



Las velocidades de onda S muestran perfiles de suelo tipo B (de acuerdo con NSR-10, título H), que corresponden a roca de rigidez media luego de 4 metros de profundidad con valores superiores a 760 m/s.

Los módulos presentan un comportamiento consistente que reflejan la tendencia del suelo a reforzar sus propiedades de elasticidad, rigidez e incompresibilidad. Los estratos comunes de cimentación a 6 m tienen módulos de Young superiores a 12000 MPa en arenas y 2700 MPa en arcillas, módulos de rigidez superiores 4700 MPa en arenas y 900 MPa en arcillas (ver anexos 8 a 13). Por el contrario, se observa como suelos con menores módulos de Poisson presentan relativamente propiedades mecánicas mayores, correspondiendo con las afirmaciones de como en los suelos poco competentes este valor es mayor. La interpretación de modelos geoeléctricos no es única y, por el contrario, está sujeta al criterio del investigador y a los rangos de resistividad relativamente amplios que presenta un mismo material. La presencia de agua subterránea explica la variación de resistividades en el suelo en función de la saturación y el contenido de sales disueltas, pues en condición natural están sometidas al contacto con minerales y factores que modifican este contenido.

Como señala [27] las areniscas se encuentran en el orden de  $10^3 \Omega m$  y esto se ajusta con la estratigrafía de la Formación Los Santos. La humedad como principal determinante de resistividad está sujeto a la baja precipitación de la zona y por tanto diferentes contenidos de humedad de un mismo suelo desplegarían valores significativamente diferentes. Los rangos predominantes del perfil de resistividades se encuentran por encima de  $1500 \Omega m$  hasta  $4000 \Omega m$  no generan indicios de cantidades significativas de agua a nivel superficial, con dos sectores de mayor conductividad que indican una mayor concentración de humedad. En la zona inferior del perfil no se presentan un cambio uniforme en la resistividad, lo cual indicaría que no se alcanza el nivel freático dentro del alcance en profundidad del perfil.

**Tabla 9.** Valores promedio de N y Vp para los lugares de estudio geotécnico

Capa (m)	El Tejar		Cancha y Cubierta		El Carrizal		Tabacal		Casa de Campo		Línea sísmica	
	N	Vp (m/s)	N	Vp (m/s)	N	Vp (m/s)	N	Vp (m/s)	N	Vp (m/s)	Vp (m/s)	Vp (m/s)
0 - 2	24,0	1215,6	27,0	1319,3	32,7	1552,3	12,3	943,0	23,0	1184,1	852,4	852,4
2 - 4	46,7	2344,0	50,0	2574,4	50,0	2574,4	15,8	1002,4	29,8	1426,6	996,9	996,9
4 - 6	50,0	2574,4	50,0	2574,4	50,0	2574,4	23,5	1199,6	50,0	2574,4	1372,2	1372,2

En el software QGis se interpolaron los datos y se obtuvieron los mapas de variación de la velocidad de onda P y del módulo de Young en las tres primeras capas de 2 metros, estos mapas se muestran en los anexos 1 al 6.

## 6. CONCLUSIONES

Se realizó el estudio preliminar para la caracterización de suelos de la región teniendo en cuenta estudios previos, lineamientos de teoría de elasticidad y parámetros geotécnicos, tomando como base de estudio los ensayos geofísicos realizados en una zona dentro del municipio de Los Santos, se puede concluir que la metodología utilizada cubre de manera simplificada el área de estudio según la cantidad de datos obtenidos tanto por ensayos de campo como de los sondeos previamente realizados por terceros. Se podría llegar a una mejor definición de las características estáticas y dinámicas con un mayor número de líneas sísmicas distribuidas sobre toda la región.

La poca cantidad de ensayos geofísicos disponibles condicionan la exactitud de los datos supuestos en lugares lejanos a la aplicación de los mismos, sin embargo, se presenta una buena aproximación de las características de estos suelos si se tiene en cuenta que los estudios geotécnicos se llevaron a cabo en sitios distribuidos y que en las muestras se observa un patrón en la clasificación de suelos y en los valores del N del ensayo SPT. Con base en lo anterior, esta metodología de estudio puede significar un precedente de estudios más amplios que complementen los resultados a través de mayor número de ensayos sísmicos y otras técnicas contempladas en la geofísica para la correlación de características estáticas y dinámicas con propiedades geotécnicas.

Los valores de constantes elásticas indican que el suelo tiene buenas características ante solicitaciones de diferente tipo y que por tanto representan materiales competentes poco deformables y por tanto sin problemas de asentamientos, tal como indican los sondeos geotécnicos. El ensayo de refracción sísmica representa una gran alternativa en el estudio del suelo pues puede abarcar una mayor extensión en un solo ensayo y es de menor costo que estudios que precisan de perforaciones, costo que se hace aún mayor cuando se trata de material

rocoso. Sin embargo, hay que anotar que debe realizarse complementariamente con otras técnicas de caracterización para calibrar las propiedades obtenidas. En general los estudios están fuertemente condicionados a las características propias del lugar de estudio, por tanto, la aplicación directa de ecuaciones y correlaciones existentes no genera resultados confiables y deberían someterse a cambios específicos en los términos originales. Los valores supuestos de Módulo de Poisson están se escogieron de manera conservadora según investigaciones anteriores y basados en los datos geotécnicos previamente conocidos en la revisión de literatura.

El ensayo de tomografía eléctrica complementó de manera adecuada los resultados, demostrando la presencia de materiales que se ajustan a los rangos de resistividad contemplados y corroborando la baja presencia de agua subterránea que puede deberse a los fenómenos de falta de precipitación de la región y que constituye un problema de estudio importante dada la demanda de las zonas rurales. Finalmente, el ensayo MASW se realizó como herramienta complementaria, sin embargo, los valores de onda cortante obtenidos no fueron consistentes con los previamente logrados en la refracción sísmica, esto puede deberse a la falta de experiencia en la ejecución del procedimiento que conlleva a errores o incluso a otros factores ambientales externos y en la interpretación de los resultados.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] APONTE GONZÁLEZ J. A. EVALUACIÓN DE MÉTODOS NO CONVENCIONALES DE CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA. (TESIS DE MAESTRÍA), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2011.

[2] AGUILAR BARDALES Z. ENSAYOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y MEDICIÓN DE ONDAS DE CORTE. Procedimiento del Seminario Taller De Mecánica De Suelos Y Exploración Geotécnica de 1992.

[3] FLORES RUIZ J. H., ÁNGELES MARTÍNEZ R., MEDINA OVANDO A., MARINES CAMPOS R. Y URRUTIA FUCUGAUCHI J. ESTIMACIÓN DE LAS CONSTANTES ELÁSTICAS DEL TERRENO EN EL ÁREA DE SALAZAR, ESTADO DE MÉXICO, A TRAVÉS DE EXPLORACIÓN SÍSMICA. Ciencia Ergo Sum, vol. 7, núm. 3, pp. 280-285, noviembre 2000.

[4] JORDÁ BOREDEHORE L. GEOFÍSICA SOMERA APLICADA A INFORMES GEOTÉCNICOS DE PEQUEÑA ESCALA: DETECCIÓN DE CAVIDADES POR TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA. Ingeopres, vol. 139, pp. 62-65, 2003.

[5] GHAZI A., HAFEZI MOGHADAS N., SADEGHI H., GHAFOORI M. AND REZA LASHKARIPUR. EMPIRICAL RELATIONSHIPS OF SHEAR WAVE VELOCITY, SPT-N VALUE AND VERTICAL EFFECTIVE STRESS FOR DIFFERENT SOILS IN MASHHAD, IRAN. Annals of Geophysics, vol. 58, núm. 3, pp. 325-336, 2015.

[6] THAKER T. P. AND RAO K. S. DEVELOPMENT OF STATISTICAL CORRELATIONS BETWEEN SHEAR WAVE VELOCITY AND PENETRATION RESISTANCE USING MASW TECHNIQUE. Proceeding of the 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference.

[7] ALFARO CASTILLO A. J. CORRELACIÓN ENTRE EL VALOR N DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR Y VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE PARA ARCILLAS EN BOGOTÁ - COLOMBIA. Revista Épsilon, n°8, pp. 13-23, enero 2007.

[8] FARROKHZAD F. AND CHOORBASTI A. J. CORRELACIÓN ENTRE EL VALOR N DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR Y VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE PARA ARCILLAS EN BOGOTÁ - COLOMBIA. INDIAN Journal of Geo Marine Sciences, vol. 45, núm. 11, pp. 1566-1577, noviembre 2016.

[9] MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA. Disponible: <http://www.georys.com/wp-content/uploads/2016/04/Presentacion-Refraccion.pdf> [citado 17 de julio de 2017].

[10] TEMA 3: TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA. Disponible: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/07.pdf?sequence=8&isAllowed=y> [citado 17 de julio de 2017].

[11] ALDANA MARTÍNEZ S. C. ESTRATIGRAFÍA DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LAS SECCIONES LA NAVARRA Y EL CALICHO EN LA MESA DE LOS SANTOS (DEPARTAMENTO DE SANTANDER). (TESIS DE PREGRADO), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2008.

[12] RINCÓN GÓMEZ M. A. ESTRATIGRAFÍA DE LA FORMACIÓN LOS SANTOS EN LAS SECCIONES LA PUNTA, CARRIZAL (MESA DE LOS SANTOS) Y LA CUEVANA (CURITI), DEPARTAMENTO DE SANTANDER. (TESIS DE PREGRADO), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2008.

[13] SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. EL SISMO DE LOS SANTOS, SANTANDER DEL 10 DE MARZO DE 2015. Bogotá D. C., 2015.

[14] SARRIA MOLINA A. INVESTIGACIÓN NO DESTRUCTIVA Y CARGAS EXTREMAS EN ESTRUCTURAS. Primera edición, Universidad de Los Andes, Bogotá D. C., 2004,

[15] REDPATH B. B. SEISMIC REFRACTION EXPLORATION FOR ENGINEERING SITE INVESTIGATIONS. U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE National Technical Information Service, May 1973.

[16] ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW). Disponible: <http://www.georys.com/wp-content/uploads/2016/04/Presentacion-masw.pdf> [citado 17 de julio de 2017].

[17] ENAMUL HAQUE D. M. 2D VELOCITY MODEL AND 1D VELOCITY PROFILE FROM MASW CONDUCTED AT MYMENSINGH TOWN, BANGLADESH. Bangladesh Journal of Geology, Vol. 26, p.98-111, 2013.

[18] PARK C. B., MILLER R. D., XIA J. AND IVANOV J. MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW)-ACTIVE AND PASSIVE METHODS. Kansas Geological Survey, january 2007.

[19] BREA-IGLESIAS A. S. APLICACIÓN DE PARÁMETROS GEOELÉCTRICOS EN EL ESTUDIO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS (CUENCA DE VALLS, TARRAGONA). (TESIS DE MAESTRÍA), Universitat de Barcelona, Barcelona, 2012.

[20] LUNA R. AND JADI H. DETERMINATION OF DYNAMIC SOIL PROPERTIES USING GEOPHYSICAL METHODS. Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, St. Louis, MO, December 2000.

[21] SALEM H. S. POISSON'S RATIO AND THE POROSITY OF SURFACE SOILS AND SHALLOW SEDIMENTS, DETERMINED FROM SEISMIC COMPRESSIONAL AND SHEAR WAVE VELOCITIES. *Geotechnique*, vol. 50, No 4, pp. 461-463, 2000.

[22] KHALIL M. H. AND HANAFY S. M. ENGINEERING APPLICATIONS OF SEISMIC REFRACTION METHOD: A FIELD EXAMPLE AT WADI WARDAN, NORTHEAST GULF OF SUEZ, SINAI, EGYPT. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 65, pp. 132-141, 2008.

[23] ATAT J. G., AKPABIO G. T., GEORGE N. J. AND UMOREN E. B. GEOPHYSICAL ASSESSMENT OF ELASTIC CONSTANTS OF TOP SOIL USING SEISMIC REFRACTION COMPRESSIONAL AND SHEAR WAVE VELOCITIES IN THE EASTERN NIGER DELTA, NIGERIA. *International Journal of Modern Applied Physics*, vol. 1, No 1, pp.7-19, 2012.

[24] GÓMEZ GÓMEZ J. D. Y CUERVO SILVA R. G., ESTUDIO GEOLÓGICO ENFOCADO A LA CARACTERIZACIÓN PAISAJÍSTICA DE LA MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER, COLOMBIA. (TESIS DE PREGRADO), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2012.

[25] DIAZ E. J., CONTRERAS N. M., PINTO J. E., VELANDIA F., MORALES C. J. E HINCAPIÉ G., EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PRELIMINAR DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS DE LA MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER. *Boletín de Geología*, vol. 31, No 1, pp. 61-70, enero 2009.

[26] ESSIEN U. E., IGBOEKWE M. U. & AKANKPO A. O. DETERMINATION OF INCOMPRESSIBILITY, ELASTICITY AND THE RIGIDITY OF SURFACE SOILS AND SHALLOW SEDIMENTS FROM SEISMIC WAVE VELOCITIES. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, vol. 6, no.1, pp. 99-111, 2016.

[27] ARIAS D. E., ECHEVERRI RAMÍREZ O. Y HOYOS PATIÑO F. RELACIONES GEOELECTRICAS EN LA EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA. Boletín de ciencias de la tierra, No 31, pp. 36-50, julio 2012.

## BIBLIOGRAFÍA

ARIAS D. E. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA – RELACIONES GEOELÉCTRICAS. (TESIS DE MAESTRIA), Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2011.

ATAT J. G., OKON AKPABIO I. & JIMMY GEORGE N. ALLOWABLE BEARING CAPACITY FOR SHALLOW FOUNDATION IN EKET LOCAL GOVERNMENT AREA, AKWA IBOM STATE, SOUTHERN NIGERIA. *International Journal of Geosciences*, vol. 4, pp. 1491-1500, 2013.

CEPEDA GOMEZ D. I. E ARENAS LOPEZ L B. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE SUELOS; ESTADO DEL ARTE E IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO. (TESIS DE PREGRADO), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.

JAFARI M. K, SHAFIEE A. & RAZMKHAH A. DYNAMIC PROPERTIES OF FINE GRAINED SOILS IN SOUTH OF TEHRAN. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, vol. 4, No 1, pp. 25-35, 2002.

JAIMES VILLAMIZAR J. D. MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS A LA CARACTERIZACIÓN DE SUELOS: ESTADO DEL ARTE. (TESIS DE PREGRADO), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.

JIN X., LUKE B. & CALDERON-MACIAS C. ROLE OF FORWARD MODEL IN SURFACE-WAVE STUDIES TO DELINEATE A BURIED HIGH-VELOCITY LAYER. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 14, pp.1-14, 2009.

KAPTAN K. A REFINED FORMULA FOR THE ALLOWABLE SOIL PRESSURE USING SHEAR WAVE VELOCITIES. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, vol. 3, pp. 90-98, March 2012.

MARTO A., CHOY SOON T. & KASIM F. A CORRELATION OF SHEAR WAVE VELOCITY AND STANDARD PENETRATION RESISTANCE. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 18, pp.463-471, 2013.

OTHMAN A. A. A. CONSTRUED GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF FOUNDATION BEDS BY SEISMIC MEASUREMENTS. *Journal of Geophysics and Engineering*, vol. 2, May 2005.

PARK C. B., MILLER R. D. & XIA J. MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACES WAVES. *GEOPHYSICS*, vol. 64, No 3, pp.800-808, May 1999.

PEGAH E. & LIU H. APPLICATION OF NEAR-SURFACE SEISMIC REFRACTION TOMOGRAPHY AND MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES FOR GEOTECHNICAL SITE CHARACTERIZATIONS: A CASE STUDY. *Engineering Geology*, vol. 208, pp. 100-113, 2016.

SESHUNARAYANA T. & SUNDARARAJAN N. MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW) FOR MAPPING SHALLOW SUBSURFACE LAYERS – A CASE STUDY, JABALPUR, INDIA. *Proceedings of the 5th Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad-2004, India*, pp. 642-646.

TEZCAN S. S. & OZDEMIR Z. A REFINED FORMULA FOR THE ALLOWABLE BEARING PRESSURE IN SOILS AND ROCKS USING SHEAR WAVE VELOCITIES. *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*, vol. 79, pp. 233-247, 2014.

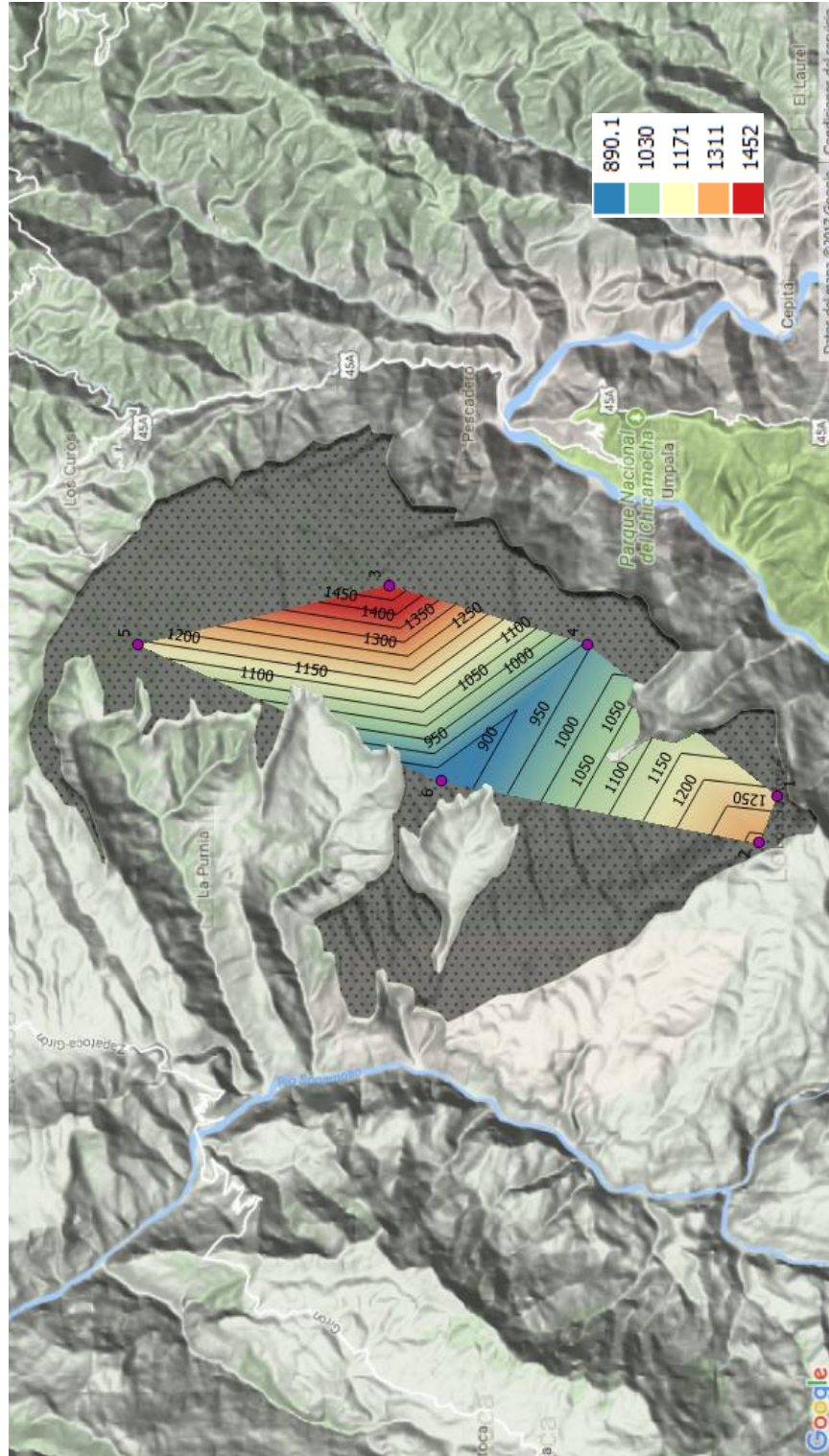
ULUGERGERLI E. U.& UYANIK O. STATISTICAL CORRELATIONS BETWEEN SEISMIC WAVE VELOCITIES AND SPT BLOW COUNTS AND THE RELATIVE DENSITY OF SOILS. *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 35, No 2, March 2007.

UYANIK O. COMPRESSIONAL AND SHEAR-WAVE VELOCITY MEASUREMENTS IN UNCONSOLIDATED TOP-SOIL AND COMPARISON OF THE RESULTS. *International Journal of the Physical Sciences*, vol. 5, pp. 1034-1039, July 2010.

XIA J., MILLER R. D. & PARK C. B. ESTIMATION OF NEAR-SURFACE SHEAR-WAVE VELOCITY BY INVERSION OF RAYLEIGH WAVES. *GEOPHYSICS*, vol. 64, No 3, pp.691-700, May 1999.

## ANEXOS

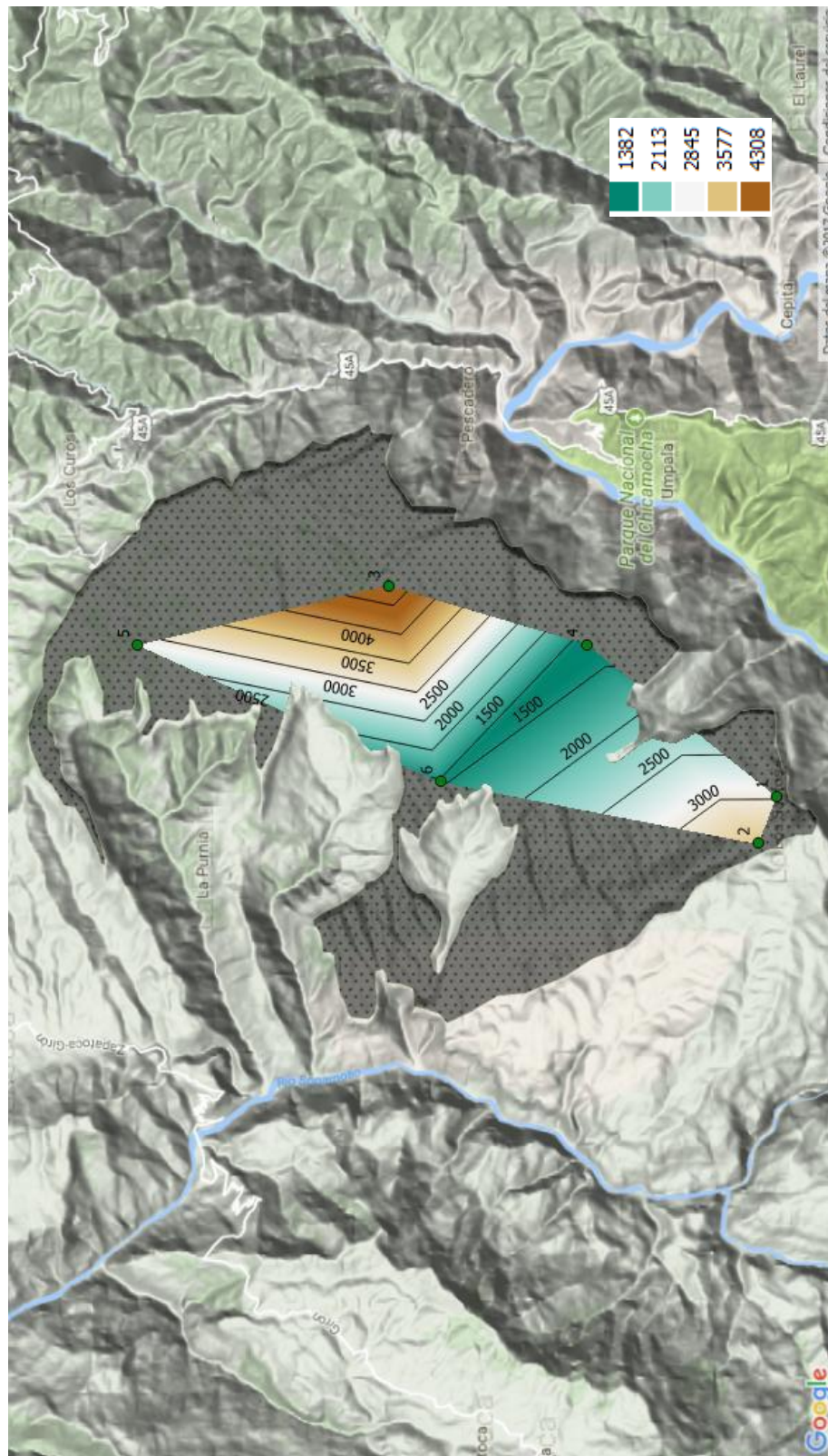
### ANEXO A: Interpolación velocidades de onda P de 0 m a 2 m con isolinias



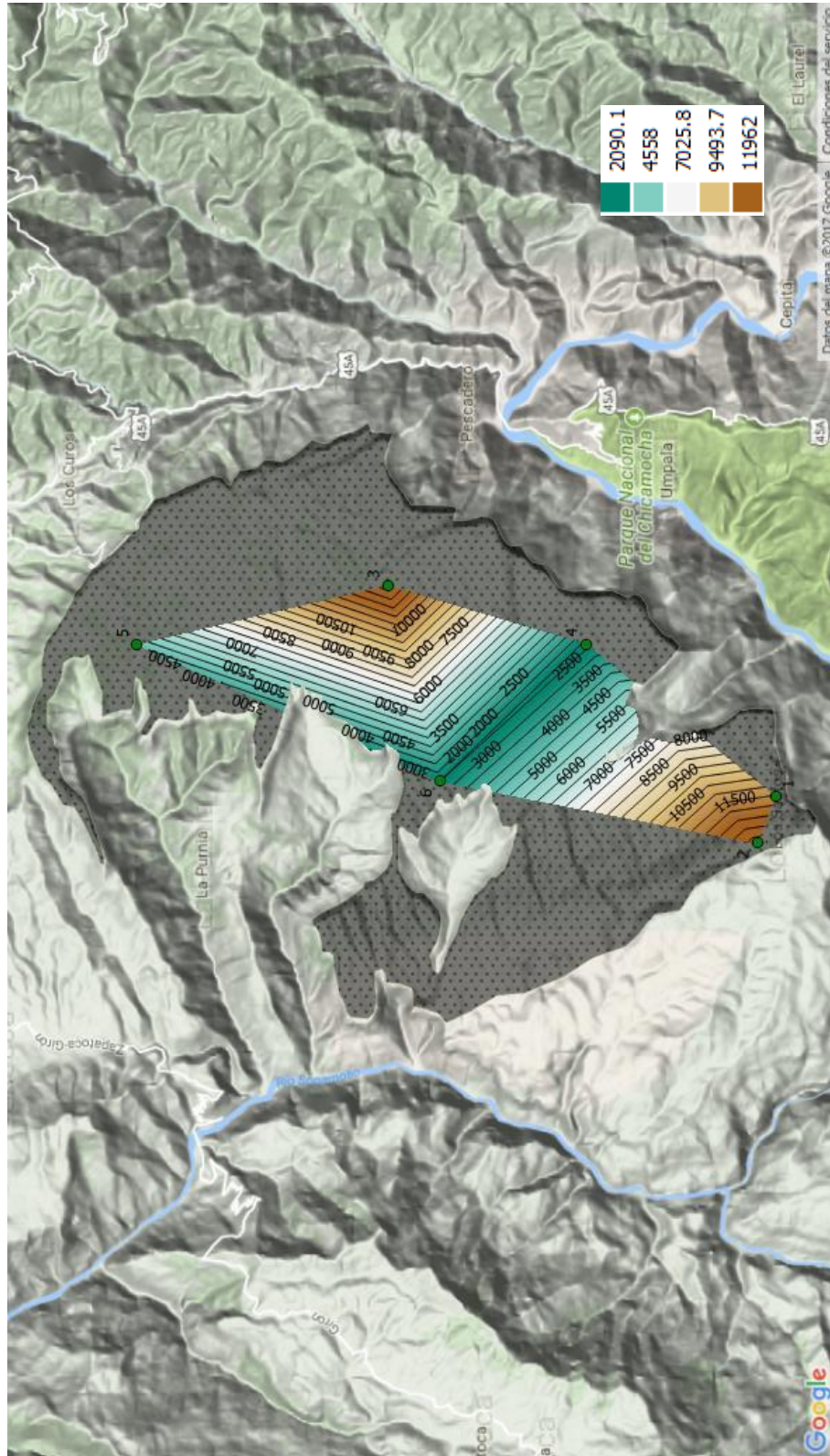




## ANEXO D: Interpolación módulos de Young de 0 m a 2 m con isoclinas

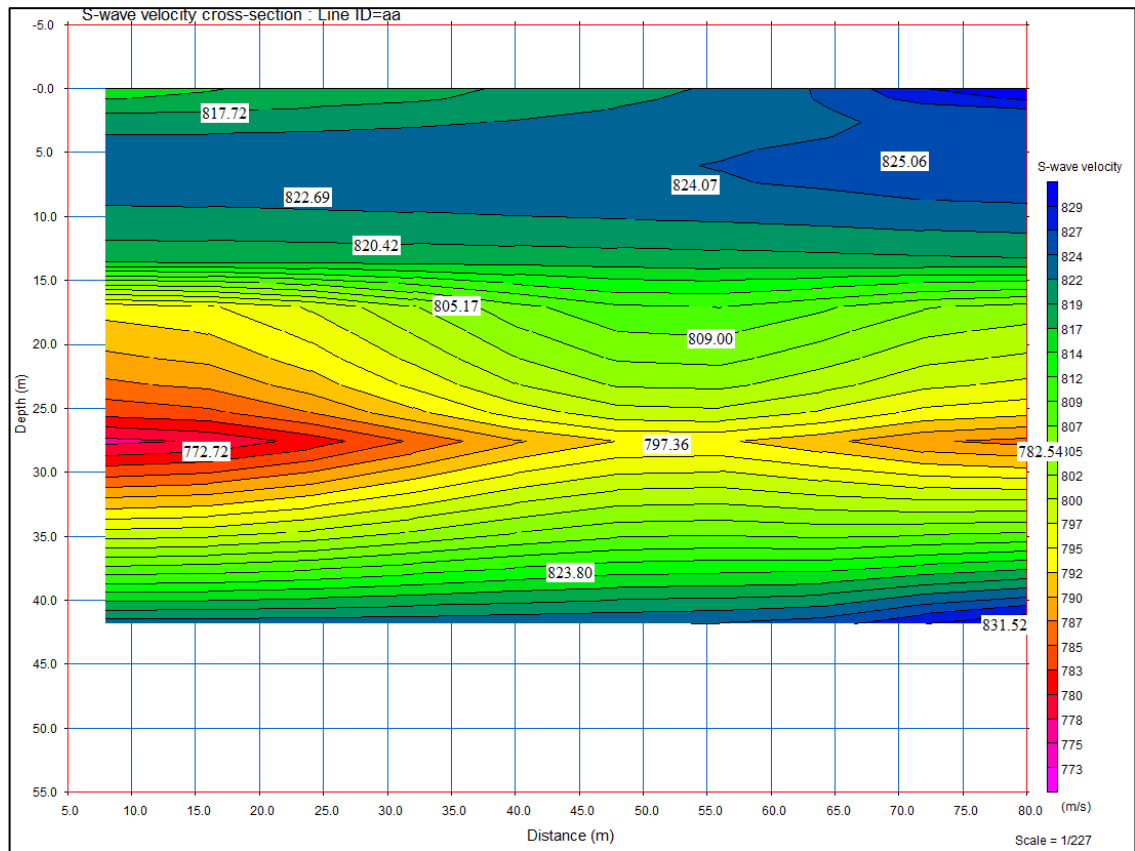


## ANEXO E: Interpolación módulos de Young de 2 m a 4 m con isoclinas





## ANEXO G: Perfil de velocidad de onda S obtenido por ensayo MASW



**ANEXO H: Módulos elásticos calculados para sitio de estudio El Tejar**

Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,25							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortant e (G) [MPa]	Constant e de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumetric o (K) [MPa]
0 - 2	1215,5 6	795,77	2080	2963,62	1185,45	1185,45	1975,75
2 - 4	2344,0 4	1534,5 4	2080	11020,4 7	4408,19	4408,19	7346,98
4 - 6	2574,3 8	1685,3 2	2080	13292,6 8	5317,07	5317,07	8861,79
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,275							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortant e (G) [MPa]	Constant e de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumetric o (K) [MPa]
0 - 2	1215,5 6	788,04	2080	2938,64	1152,41	1280,45	2176,77
2 - 4	2344,0 4	1519,6 4	2080	10927,5 9	4285,33	4761,48	8094,51

4 - 6	2574,3 8	1668,9 6	2080	13180,6 6	5168,89	5743,21	9763,45
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,3							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortant e (G) [MPa]	Constant e de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumetric o (K) [MPa]
0 - 2	1215,5 6	780,01	2080	2910,67	1119,49	1679,23	2425,56
2 - 4	2344,0 4	1504,1 5	2080	10823,5 9	4162,92	6244,38	9019,65
4 - 6	2574,3 8	1651,9 5	2080	13055,2 1	5021,24	7531,85	10879,34
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,325							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortant e (G) [MPa]	Constant e de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumetric o (K) [MPa]
0 - 2	1215,5 6	771,65	2080	2879,57	1086,63	2018,03	2742,45
2 - 4	2344,0 4	1488,0 2	2080	10707,9 4	4040,73	7504,22	10198,04

4 - 6	2574,3 8	1634,2 4	2080	12915,7 3	4873,86	9051,45	12300,69
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,35							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	1215,5 6	762,94	2080	2845,21	1053,78	2458,82	3161,34
2 - 4	2344,0 4	1471,2 3	2080	10580,1 4	3918,57	9143,33	11755,71
4 - 6	2574,3 8	1615,8 0	2080	12761,5 7	4726,51	11028,52	14179,53

**ANEXO I: Módulos elásticos calculados para sitio de estudio Cancha y  
Cubierta**

Módulo de Poisson $[\sigma] = 0,25$							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	1319,3 1	863,69	2080	3491,12	1396,45	1396,45	2327,41
2 - 4	2574,3 8	1685,3 2	2080	13292,6 8	5317,07	5317,07	8861,79
4 - 6	2574,3 8	1685,3 2	2080	13292,6 8	5317,07	5317,07	8861,79
Módulo de Poisson $[\sigma] = 0,275$							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	1319,3 1	855,31	2080	3461,70	1357,53	1508,37	2564,22

2 - 4	2574,3 8	1668,9 6	2080	13180,6 6	5168,89	5743,21	9763,45
4 - 6	2574,3 8	1668,9 6	2080	13180,6 6	5168,89	5743,21	9763,45
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,3							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortant e (G) [MPa]	Constant e de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumetric o (K) [MPa]
0 - 2	1319,3 1	846,59	2080	3428,75	1318,75	1978,13	2857,29
2 - 4	2574,3 8	1651,9 5	2080	13055,2 1	5021,24	7531,85	10879,34
4 - 6	2574,3 8	1651,9 5	2080	13055,2 1	5021,24	7531,85	10879,34
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,325							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortant e (G) [MPa]	Constant e de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumetric o (K) [MPa]
0 - 2	1319,3 1	837,51	2080	3392,12	1280,05	2377,23	3230,59

2 - 4	2574,3 8	1634,2 4	2080	12915,7 3	4873,86	9051,45	12300,69
4 - 6	2574,3 8	1634,2 4	2080	12915,7 3	4873,86	9051,45	12300,69
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,35							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	1319,3 1	828,06	2080	3351,63	1241,35	2896,47	3724,04
2 - 4	2574,3 8	1615,8 0	2080	12761,5 7	4726,51	11028,52	14179,53
4 - 6	2574,3 8	1615,8 0	2080	12761,5 7	4726,51	11028,52	14179,53

## ANEXO J: Módulos elásticos calculados para sitio de estudio El Carrizal

Módulo de Poisson $[\sigma] = 0,25$							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	1552,28	1016,20	2080	4832,90	1933,16	1933,16	3221,94
2 - 4	2574,38	1685,32	2080	13292,68	5317,07	5317,07	8861,79
4 - 6	2574,38	1685,32	2080	13292,68	5317,07	5317,07	8861,79
Módulo de Poisson $[\sigma] = 0,275$							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	1552,28	1006,34	2080	4792,17	1879,28	2088,09	3549,76
2 - 4	2574,38	1668,96	2080	13180,66	5168,89	5743,21	9763,45

4 - 6	2574,3 8	1668,9 6	2080	13180,6 6	5168,89	5743,21	9763,45
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,3							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortant e (G) [MPa]	Constant e de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumetric o (K) [MPa]
0 - 2	1552,2 8	996,08	2080	4746,56	1825,60	2738,40	3955,47
2 - 4	2574,3 8	1651,9 5	2080	13055,2 1	5021,24	7531,85	10879,34
4 - 6	2574,3 8	1651,9 5	2080	13055,2 1	5021,24	7531,85	10879,34
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,325							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortant e (G) [MPa]	Constant e de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumetric o (K) [MPa]
0 - 2	1552,2 8	985,40	2080	4695,85	1772,02	3290,89	4472,24
2 - 4	2574,3 8	1634,2 4	2080	12915,7 3	4873,86	9051,45	12300,69

4 - 6	2574,3 8	1634,2 4	2080	12915,7 3	4873,86	9051,45	12300,69
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,35							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	1552,2 8	974,28	2080	4639,80	1718,45	4009,71	5155,34
2 - 4	2574,3 8	1615,8 0	2080	12761,5 7	4726,51	11028,52	14179,53
4 - 6	2574,3 8	1615,8 0	2080	12761,5 7	4726,51	11028,52	14179,53

**ANEXO K: Módulos elásticos calculados para sitio de estudio Tabacal Home Resort**

Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,49							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumetrico (K) [MPa]
0 - 2	845,25	491,23	2080	1249,76	419,38	20549,73	20829,32
2 - 4	1018,50	591,91	2080	1814,59	608,92	29837,18	30243,13
4 - 6	1249,50	726,16	2080	2731,04	916,46	44906,40	45517,37

**ANEXO L: Módulos elásticos calculados para sitio de estudio Casa de Campo**

Módulo de Poisson $[\sigma] = 0,25$							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	1184,05	775,14	2080	2811,96	1124,78	1124,78	1874,64
2 - 4	1426,57	933,91	2080	4081,85	1632,74	1632,74	2721,24
4 - 6	2574,38	1685,32	2080	13292,68	5317,07	5317,07	8861,79
Módulo de Poisson $[\sigma] = 0,275$							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	1184,05	767,62	2080	2788,27	1093,44	1214,93	2065,38

2 - 4	1426,5 7	924,84	2080	4047,45	1587,24	1763,60	2998,11
4 - 6	2574,3 8	1668,9 6	2080	13180,6 6	5168,89	5743,21	9763,45
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,3							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortant e (G) [MPa]	Constant e de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumetric o (K) [MPa]
0 - 2	1184,0 5	759,79	2080	2761,73	1062,20	1593,30	2301,44
2 - 4	1426,5 7	915,42	2080	4008,93	1541,90	2312,85	3340,78
4 - 6	2574,3 8	1651,9 5	2080	13055,2 1	5021,24	7531,85	10879,34
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,325							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortant e (G) [MPa]	Constant e de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumetric o (K) [MPa]
0 - 2	1184,0 5	751,65	2080	2732,22	1031,03	1914,76	2602,11

2 - 4	1426,5 7	905,60	2080	3966,10	1496,64	2779,48	3777,24
4 - 6	2574,3 8	1634,2 4	2080	12915,7 3	4873,86	9051,45	12300,69
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,35							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	1184,0 5	743,16	2080	2699,61	999,86	2333,00	2999,57
2 - 4	1426,5 7	895,38	2080	3918,76	1451,39	3386,59	4354,18
4 - 6	2574,3 8	1615,8 0	2080	12761,5 7	4726,51	11028,52	14179,53

### ANEXO M: Módulos elásticos calculados para sitio de Línea Sísmica

Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,25							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	852,38	558,01	2080	1457,24	582,90	582,90	971,49
2 - 4	996,92	652,64	2080	1993,36	797,35	797,35	1328,91
4 - 6	1372,22	898,33	2080	3776,74	1510,70	1510,70	2517,83
Módulo de Poisson [ $\sigma$ ] = 0,49							
Capa [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young (E) [MPa]	Módulo Cortante (G) [MPa]	Constante de Lamé ( $\lambda$ ) [MPa]	Módulo Volumétrico (K) [MPa]
0 - 2	852,38	495,37	2080	1270,92	426,48	20897,63	21181,96

---

2 - 4	996,92	579,37	2080	1738,5 0	583,39	28586,00	28974,93
4 - 6	1372,2 2	797,48	2080	3293,8 5	1105,32	54160,63	54897,51

---

## ANEXO N: Resumen de ensayos de laboratorio para muestras

<b>Muestra</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Clasificación (SUCS)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Límite líquido</b>	<b>Límite plástico</b>	<b>Índice de plasticidad</b>
1	1	SM - SC	8,51	N	N	N
2	2	SM - SC	9,83	N	N	N
3	2	SM - SC	8,37	N	N	N
4	2	SM - SC	9,77	N	N	N
5	2	SM - SC	9,03	N	N	N
6	3	SM - SC	8,64	N	N	N
7	2	SM - SC	7,07	27	20,18	6,82
8	2	SM - SC	4,35	17	12,86	4,14
9	1	CL - ML	5,23	20	13,62	6,38
10	2	CL - ML	4,88	20	14,42	5,58
11	1	SC	27,17	35,5	23,1	12,4
12	2	SM	21,64	N	N	N
13	2	SM	22,36	N	N	N
14	2	SM	17,67	N	N	N
15	1	SM	20,6	N	N	N
16	2	SM	10,35	N	N	N
17	2	SC	22,36	52,8	N	52,8

18	3	SM	17,44	N	N	N
19	2	SM	22,51	N	N	N
20	3	SM	19,14	N	N	N
21	4	CL - ML	14	22,1	15,75	6,35
22	6	ML	19,66	25	19,84	5,16
23	2	CL	22,13	27,5	18,2	9,3
24	6	ML	18,28	24,3	18,08	6,22
25	2	CL	19,33	38	15,99	22,01
26	6	CL	20,25	24,8	16,85	7,95
27	3	CL	17,99	24,5	16,18	8,32
28	4	CL	11,58	24,8	16,85	7,95
29	6	CL	15,8	38	15,99	22,01
30	3	CL	19,58	24,3	18,08	6,22
31	6	CL	18,83	27,5	18,2	9,3
32	2	CL - ML	17,98	25	19,84	5,16
33	6	CL - ML	18,59	22,1	15,75	6,35
34	1	SM	9,8	45,5	30,4	15,1
35	4	SM	8,9	46,2	30,1	16
36	7	SM	6,8	31,7	23,3	8,4