

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS DE LOS SUELOS
MEDIANTE EL USO DEL APARATO DE REFRACCIÓN SÍSMICA EN UN LOTE
DEL MUNICIPIO DE CHARTA, SANTANDER**

SERGIO ALEJANDRO MERCHÁN GÁMEZ

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

2016

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS DE LOS SUELOS
MEDIANTE EL USO DEL APARATO DE REFRACCIÓN SÍSMICA EN UN LOTE
DEL MUNICIPIO DE CHARTA, SANTANDER**

SERGIO ALEJANDRO MERCHÁN GÁMEZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Director

Ing. Civil MSc. WILFREDO DEL TORO RODRÍGUEZ

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

2016

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle a:

La Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingenierías Civil. Al Ingeniero Civil MSc Wilfredo Del Toro Rodríguez, director del proyecto, quien con su conocimiento apporto para mi formación académica y fue la persona que me brindo su confianza, orientación y colaboración para realizar este proyecto.

Los ingenieros Héctor Torres y Leonardo Wandurraga, quienes amablemente me guiaron y brindaron su conocimiento para hacer posible este proyecto.

Al grupo de docentes de la Universidad Industrial de Santander, quienes a lo largo de esta etapa han hecho un gran aporte a mi formación.

DEDICATORIA

Primeramente a Dios y a la Virgencita de Chiquinquirá, fuente de inspiración, sabiduría y sobretodo, han sido mi refugio en los momentos difíciles.

A mis amados padres Tomás Merchán y Carmenza Gámez, las palabras no son suficientes para describir todo el agradecimiento que tengo, son el motor de mi vida, las personas que más admiro y respeto, quienes me enseñaron aquello que considero más importante de la vida, el amor por la familia, este logro ha sido el fruto del esfuerzo, la dedicación y confianza que Uds. me brindaron.

A mi hermano Dieguito, he sido bendecido al contar con un gran ser humano como hermano, dentro de sus cualidades hay algo que admiro más, su amor y pasión por la vida de los animalitos, defensor incansable de estos maravillosos seres.

A mi familia, todos y cada uno de Uds. Les agradezco por su confianza y sobre todo el cariño que siempre me han brindado. A mi súper abuela, Helena, incansable y alegre, a una personita que se ganó mi corazón y es parte fundamental de este logro, Danielito, Sarita no podía faltar, a mis primos y tíos, especialmente a mi tía Claudia, y mis tíos Jorge y Nelson, como olvidar sus palabras en aquellas situaciones difíciles de este proceso, hoy tengo que decir gracias.

A aquellas personas que han sido muy importantes en mi vida y que hoy lastimosamente no están presentes, a mi abuelita Herminda, mi abuelo Tomas y mi tío Omar.

A mis amigos, a lo largo de la vida uno se encuentra con personas maravillosas que terminan formando parte de uno, esa familia que durante el transcurso de la vida va creciendo, gracias por su cariño, respeto y sobre todo por acompañarme en las distintas etapas de mi vida.

A todos muchas gracias, Dios los bendiga.

SERGIO ALEJANDRO MERCHÁN GÁMEZ

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	14
1.OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO TEORICO	17
2.1 PROPAGACIÓN DE ONDAS	17
2.1.1 Tipos de ondas	17
2.1.1.1 Ondas de Compresión (ondas P).....	18
2.1.1.2 Ondas de Corte (ondas S).....	18
2.2 PRINCIPIOS Y LEYES SOBRE LAS CUALES SE BASA EL ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA.	19
2.2.1 Refracción.....	19
2.2.1.1 Índice de refracción	19
2.2.2 Ley de Snell.	20
2.2.3 Principio de Huygens.....	20
2.2.4 Principio de Fermat.....	21
2.3 PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS.....	21
2.3.1 Relación de Poisson (ν) [4].....	21
2.3.2 Modulo de Rigidez o de corte (G) [4].	22
2.3.3 Modulo de Young (E).....	22
2.3.4 Modulo de Bulk (B) [4].	23
3. METODOLOGIA	25
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.2 ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN.....	25

3.2.1 Métodos de exploración sísmica	25
3.2.1.1 Sondeo de penetración estándar [11]	26
3.2.1.2 Ensayo de refracción sísmico.....	27
3.3 LOCALIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO	28
3.3.1 Descripción geográfica del municipio de Charta.....	29
3.3.2 Características geológicas y geotécnicas.	30
3.3.2.1 Depósitos aluviales (qal).	30
3.3.2.2 Geología Estructural.....	30
3.3.2.3 Falla del Río Charta.....	30
3.3.2.4 Falla La Cristalina.	30
3.3.2.5 Lineamientos y fallas asociadas.....	31
3.3.2.6 Pliegues.	31
4 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EXPLORACIÓN	32
4.1 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA (SPT) (ANEXO A).....	32
4.1.1 Localización de los sondeos.....	32
4.1.2 Resultados de los ensayos in Situ y en laboratorio	33
4.2 MÉTODO GEOFÍSICO	35
4.2.1 Reconocimiento a la zona de estudio.	36
4.2.3 Conexión del tendido sísmico.....	37
4.2.4 Adquisición de Datos.....	38
4.3 PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN.....	40
5 CONCLUSIONES	44
6. REFERENCIA.....	47
7. BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXOS	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los métodos de exploración.	26
Tabla 2. Resumen ensayos SPT.	33
Tabla 3. Resumen resultados ensayos de laboratorio a las muestra de suelo extraído.	34
Tabla 4. Numero de golpes y parámetros usados para la toma de datos con el software Geometrics Seismodule Controller. (<i>En el Anexo B se establece el proceso para hacer el ingreso de los parámetros para la toma de datos en cada uno de los ensayos realizados</i>)	39
Tabla 5. Localización de los puntos de tiro.	39
Tabla 6. Ecuaciones usadas para el cálculo de los parámetros dinámicos del suelo a partir de la gráfica de velocidades de ondas S, Vs.	42
Tabla 7. Calculo de velocidades de ondas S, ondas P y los parámetros dinámicos del sub-suelo a partir de las ecuaciones de la tabla 7.	43
Tabla 8. Clasificación de los suelos de acuerdo a la NSR-10 tabla A.2.4-1.	46

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Propagación de ondas de compresión.....	18
Ilustración 2. Propagación ondas de corte.	18
Ilustración 3. Ejemplo de un análisis de refracción, donde se describen las velocidades de ondas de corte para cada tipo de material	19
Ilustración 4. Cambio de ángulo de las ondas al pasar de un material a otro.	21
Ilustración 5. Ejemplo grafico del modulo de Rigidez.	22
Ilustración 6. Ejemplo grafico del modulo Elastico	23
Ilustración 7. Ejemplo grafico del modulo de Bulk	24
Ilustración 8. <i>Descripción gráfica del ensayo SPT</i>	27
Ilustración 9. <i>Localización de los geófonos para la línea de refracción</i>	28
Ilustración 10. Esquema generación de ondas por un medio activo.	28
Ilustración 11. <i>Zona de estudio</i>	29
Ilustración 12. Vista general zona de estudio.....	29
Ilustración 13. Vista sondeo 3.	32
Ilustración 14. Localización aprox. de los sondeos y el tendido sísmico , la línea azul representa el tendido sísmico	33
Ilustración 15. Este perfil estratigráfico es la muestra más representativa del material encontrado en los sondeos.....	34
Ilustración 16. Modelo 1. Resultado del análisis del ensayo de refracción sísmica, representado en un modelo simplificado de dos capas. (Elevation: msnm; Distance: distancia horizontal)	41
Ilustración 17. Modelo 2. Resultado del análisis del ensayo de refracción sísmica, representado en un modelo de Tomografía 2D (Elevation: msnm; Distance: distancia horizontal).	41
Ilustración 18. Modelo 2. Tomografía 2D	45

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A PROCEDIMIENTO	50
ANEXO B PROCEDIMIENTO TOMA DE DATOS	57
ANEXO C PROCEDIMIENTO ANÁLISIS DE DATOS	65

RESUMEN

TITULO: DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DINAMICOS DE LOS SUELOS MEDIANTE EL USO DEL APARATO DE REFRACCION SISMICA EN UN LOTE DEL MUNICIPIO DE CHARTA, SANTANDER.

AUTOR: SERGIO ALEJANDRO MERCHAN GAMEZ

PALABRAS CLAVE: Métodos sísmicos, refracción sísmica, estratigrafía, tomografía, velocidad de onda, NSR-10.

DESCRIPCIÓN

El municipio de Charta –Santander, desarrolla el proyecto de vivienda “Urbanización Villa Suarez”, para el cual se han realizado estudios geotécnicos mediante ensayos de campo, donde se hicieron sondeos a rotación y percusión en tramos de 50 cms de longitud haciendo ensayos de penetración estándar SPT en cada uno de ellos, determinando un perfil estratigráfico típico de la zona de estudio, los parámetros mecánicos del suelo y la clasificación del perfil del suelo de acuerdo a la norma NSR-10. Dado que los métodos geofísicos son en la actualidad un alternativa para la caracterización y exploración geotécnica, sirviendo en este caso como complemento a los resultados obtenidos mediante los sondeos, se hizo un tendido sísmico o línea de refracción que se extendió a lo largo del lote, el cual aprovechando la propagación de las ondas generadas por medio impulsivo, se puede obtener un perfil de velocidades de ondas de compresión (ondas P) que permite determinar los estratos a profundidad de suelos a partir del modelamiento de los datos mediante el uso de software, verificando la información obtenida en los sondeos. Además generar un perfil de tomografía con el cual se determina la profundidad de basamento basándose en las velocidades de onda P.

Con el mismo tendido sísmico se hizo un ensayo de ondas superficiales, con el cual se determinan las velocidades de ondas S, estas son la base para el cálculo de los parámetros dinámicos del suelo, además este método es de gran importancia ya que de acuerdo a la norma NSR-10 para clasificar un perfil de suelo, son las velocidades de ondas Vs el primer parámetro para determinar el tipo de perfil.

*Proyecto de grado

**Facultad de Físico - Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Wilfredo Del Toro Rodríguez MSc.

ABSTRACT

DYNAMIC SOIL PARAMETERS DETERMINATION BY THE USE OF SEISMIC REFRACTION EQUIPMENT IN A LOT OF THE MUNICIPALITY OF CHARTA IN SANTANDER DEPARTMENT*.

AUTHOR: SERGIO ALEJANDRO MERCHAN GAMEZ**

KEYWORDS: seismic methods, seismic refraction, stratigraphy, tomography, wave velocity, NSR-10

DESCRIPTION

The municipality of Charta, –Santander, develops the housing project "Urbanization Villa Suarez", for which geotechnical studies have been conducted through field trials, where rotation and percussion soundings were performed in lengths of 50 cm in length by standard penetration tests SPT in each, determining a characteristic stratigraphic profile of the study area, the mechanical parameters of soil and soil profile classification according to the NSR-10 standard. Since geophysical methods are now an alternative for characterization and geotechnical exploration, serving in this case as a complement to the results obtained by the soundings, it was performed a laying seismic or refractive line that was spread throughout the lot, taking advantage of wave propagation generated by impulsive means, it can get a velocity profile of compression waves (P waves) which allows to determine the strata in-depth of soils from modeling data using software, verifying the information obtained in the soundings. Furthermore, to generate a profile of tomography which can determine the depth of base based on the P-wave velocity.

With the same laying seismic, it was performed an assay of surface waves, whereby the wave velocities S are determined, speeds that are the basis for calculating the dynamic parameters of the soil, moreover, this method is of great importance according to the NSR-10 standard for classifying a soil profile, these are the wave velocities versus the first parameter to determine the type of profile.

*Degree Project

**Physicomechanical faculty, School of Civil Engineering, Director: Wilfredo Del Toro Rodriguez MSc.

INTRODUCCION

A medida que avanzan las obras de ingeniería, se hace necesario contar con herramientas y métodos para el desarrollo de actividades de una forma más rápida, sin dejar de ser confiables y eficientes, manteniendo los estándares de calidad.

Como las obras de ingeniería civil se apoyan sobre el suelo de una u otra manera, su estabilidad y comportamiento funcional están determinados por el desempeño del suelo donde se asienta la estructura; por este motivo se han desarrollado un conjunto de métodos de estudio del suelo, los cuales implican su estudio físico, químico y biológico.[1]

En geotecnia los métodos de exploración se dividen en: indirectos (geofísicos), semidirectos y directos (sondeos). [2]

Para el desarrollo del proyecto de vivienda “Urbanización Villa Suarez” se realizó una exploración directa mediante sondeos, del cual se extrajeron muestras a las cuales se le realizaron pruebas de laboratorio que sirvieron para conocer las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo. Para complementar la información obtenida con el método anteriormente mencionado, se aplicó un método indirecto de exploración, como lo es el de refracción sísmica, mediante el cual se interpretaron los resultados para determinar las propiedades dinámicas del suelo.

Con este método se mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre un sitio donde se generan las ondas sísmicas y la llegada de estas a diferentes puntos de observación. Para esto se disponen una serie de sensores en línea a distancias conocidas, formando lo que se conoce como

tendido sísmico o línea de refracción. A una distancia conocida del extremo de la línea, en el punto de disparo, se generan las ondas sísmicas, con la ayuda de un martillo o por la detonación de explosivos, las cuales generan vibraciones en el terreno que son detectadas por cada uno de los sensores de la línea de refracción. Los registros de cada sensor tienen información de los movimientos del terreno en función del tiempo y son conocidos como sismogramas, estos son analizados en la refracción sísmica para obtener el tiempo de llegada de las primeras ondas a cada sensor desde el punto de disparo. [3]

En el presente proyecto de investigación se complementó la información obtenida con los sondeos realizados al lote; con el uso del aparato de refracción sísmica

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Aplicar el método de refracción sísmica para la determinación de los parámetros dinámicos de los suelos, mediante interpretación de los resultados de los ensayos de campo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir un perfil estratigráfico típico de la zona de estudio a partir de sondeos mecánicos realizados
- Revisar las características geotécnicas de los suelos.
- Determinar la profundidad de basamento a partir de la interpretación de un ensayo de refracción sísmica.
- Determinar las características dinámicas de los suelos mediante el ensayo de refracción sísmica.

2. MARCO TEORICO

Para el desarrollo adecuado de la investigación es importante conocer los principios, teorías y leyes que son base para el método de refracción sísmica, se presenta a continuación los tipos de ondas que se estudian para el método, además de los principios y leyes físicas que sirven de base para el análisis de los resultados y los parámetros dinámicos, los cuales son la base de esta investigación y sirven de complemento a la información obtenida de los sondeos.

2.1 PROPAGACIÓN DE ONDAS

Cuando se generan ondas en las masas de suelo, las cuales pueden ser producto de sismos, explosivos o golpes, estas incluyen ondas sísmicas internas (primarias y secundarias), y superficiales (love y Rayleigh).

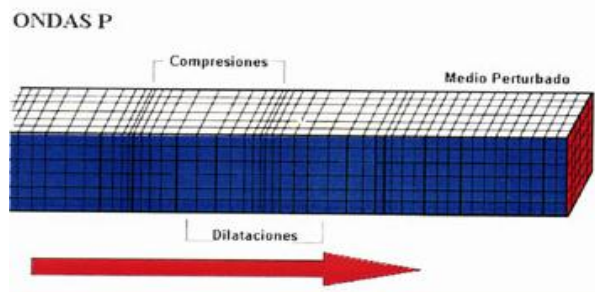
Las ondas P, también conocidas como ondas de compresión, son las que se obtienen en el ensayo de refracción sísmica.

2.1.1 Tipos de ondas. Los sismos generan dos tipos de ondas elásticas que se propagan a través del medio: las ondas primarias o de compresión y las ondas superficiales. La velocidad de propagación depende de la densidad del medio y de sus propiedades elásticas, el módulo de compresibilidad y el módulo de rigidez.

Las ondas elásticas generan fuerzas y deformaciones que obedecen la teoría de elasticidad, en la cual los cuerpos solidos tienen la propiedad de resistir cambios de tamaño o de forma y de regresar a la condición no deformada cuando se eliminan las fuerzas externas. [3]

2.1.1.1 Ondas de Compresión (ondas P). Estas ondas se propagan con una mayor velocidad que las demás, por lo que estas son las que se registran primero, estas ondas tiene una velocidad dependiendo del material por el que se propaguen entre los 300 y 7000 m/s, estas ondas se propagan en medios sólidos y líquidos. Al propagarse hacen vibrar las partículas en el mismo sentido del tren de ondas, produciendo compresión y dilatación a su paso, estas ondas también se pueden denominar o llamar ondas longitudinales (ondas P). [3]

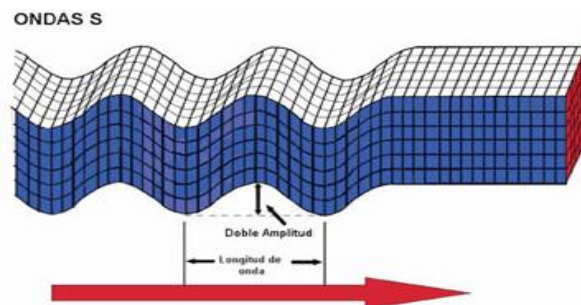
Ilustración 1. Propagación de ondas de compresión.



Fuente. Ingeniería sísmica, Alberto Sarria

2.1.1.2 Ondas de Corte (ondas S). Estas ondas a diferencia de las ondas P se propagan únicamente en materiales sólidos, y las vibraciones se propagan en sentido perpendicular al sentido de propagación de las ondas P, su velocidad de onda oscila en el 50% de la velocidad de las ondas P, por lo que su periodo es generalmente dos veces que el periodo de las ondas P. [4]

Ilustración 2. Propagación ondas de corte.

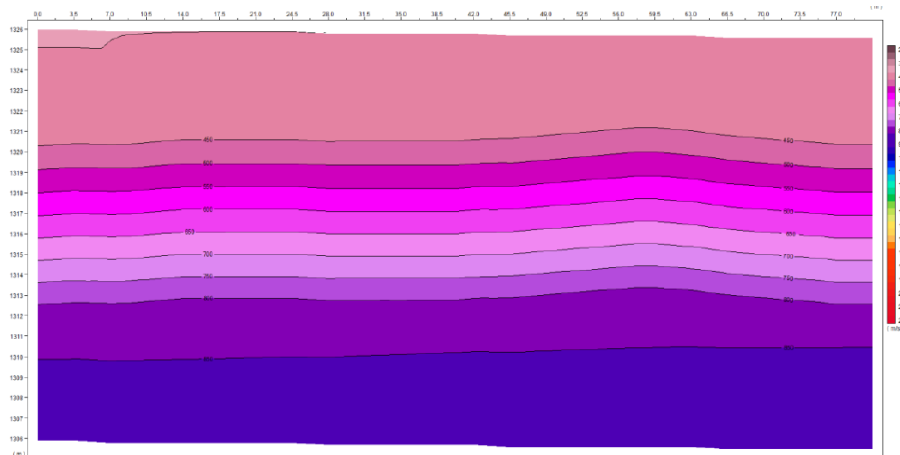


Fuente. Ingeniería sísmica, Alberto Sarria

2.2 PRINCIPIOS Y LEYES SOBRE LAS CUALES SE BASA EL ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA.

2.2.1 Refracción. La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro. Solo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos. La refracción se origina en el cambio de velocidad de propagación de la onda, cuando pasa de un medio a otro. [5]

Ilustración 3. Ejemplo de un análisis de refracción, donde se describen las velocidades de ondas de corte para cada tipo de material



Fuente. Informe estudios de refracción, Jeorpobe S.A.S.

2.2.1.1 Índice de refracción. La velocidad de la luz en el vacío es la misma para todas las longitudes de onda, pero cuando se propaga en un medio material es diferente para cada longitud de onda. La frecuencia de una onda luminosa está determinada por la fuente y no varía al propagarse. Si la frecuencia variase al pasar la luz de un medio a otro medio, se acumularía energía en la superficie de separación de los mismos, lo que se observa que ocurre.

La velocidad de propagación de la luz en un medio es menor que en el vacío, mientras que su frecuencia no varía. Por lo tanto, la longitud de onda debe variar al cambiar de medio. El índice de refracción (n) de un medio material se define como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad de la luz en el medio (v). [6]

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

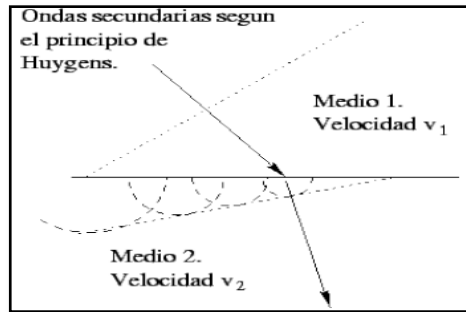
2.2.2 Ley de Snell. Es una ecuación para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación de luz (o cualquier onda electromagnética) con índice de refracción distinto. La misma afirma que la multiplicación del índice de refracción por el seno del ángulo de incidencia es constante para cualquier rayo de luz incidiendo sobre la superficie separatriz de dos medios.

Aunque la ley de Snell fue formulada para explicar los fenómenos de refracción de la luz, se puede aplicar a todo tipo de ondas atravesando una superficie de separación entre dos medio en los que la velocidad de propagación de la onda varié. La relación entre los ángulos según la ley de Snell: [7]

$$\frac{v_1}{\text{sen}\theta_1} = \frac{v_2}{\text{sen}\theta_2} \quad (2)$$

2.2.3 Principio de Huygens. La teoría de Huygens está basada en una construcción geométrica, llamada principio de Huygens, que permite determinar la posición de un frente de onda en un tiempo futuro, si se conoce su posición presente; este principio dice: ***“todos los puntos de un frente de onda pueden considerarse como fuentes puntuales que producen ondas esféricas secundarias. Después de un tiempo t , la nueva posición del frente de onda será la superficie tangente a estas ondas secundarias.”*** [8]

Ilustración 4. Cambio de ángulo de las ondas al pasar de un material a otro.



Fuente. <http://www.esmijovi.com/descargas/ondas2.pdf>

2.2.4 Principio de Fermat. El principio de Fermat es otra manera de expresar la ley de reflexión. Es decir que la luz para viajar entre dos puntos siempre viaja por una trayectoria la cual se tarda el mismo tiempo en recorrer la distancia entre dichos puntos, cabe resaltar que la ley afirma que es el **tiempo** el que es mínimo, no el espacio que recorre. [9]

2.3 PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS

La dinámica de suelos estudia el comportamiento del suelo y la respuesta de masas del suelo durante la aplicación rápida de carga, el uso de vibraciones para mejorar las propiedades ingenieriles de suelo y el uso de transmisión de ondas para evaluar las propiedades del terreno. [10]

2.3.1 Relación de Poisson (ν) [4]. Relación entre los cambios unitarios de la sección transversal y la deformación longitudinal, la velocidad de propagación de las ondas sísmicas están relacionadas con las propiedades elásticas del medio de propagación; entonces, la relación de Poisson queda como:

$$\nu = \frac{(v_p/v_s)^2 - 2}{2(v_p/v_s)^2 - 2} \quad (3)$$

$v_p \equiv$ Velocidad de ondas P (Ondas de compresión)

$v_s \equiv$ Velocidad de ondas S (Ondas de corte)

Los materiales de la corteza terrestre presentan un rango de velocidades que va desde 100 a 7000 m/s; sus frecuencias oscila entre 10 y 200 Hertz, las longitudes de onda van desde 1 a 600 m, entonces, los cuerpos buscados en ingeniería con dimensiones de 1 a 30 m son encontrados facilmente. [4]

2.3.2 Modulo de Rigidez o de corte (G) [4]. Es la relación entre el esfuerzo trasnversal unitario y el desplazamiento relativo de los planos de deslizamiento; mientras que la expresion que lo define esta dada por:

$$Vp = 1.11Vs + 1290 \text{ (Kitsunezaki, 1990) (4)}$$

$$p = 1.2475 + 0.399Vp - 0.026Vp^2 \text{ (Ludwig, 1970) (5)}$$

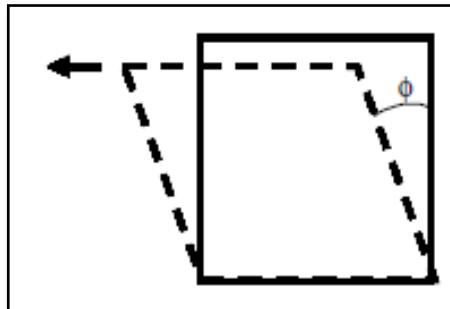
$$G = pVs^2 \text{ (6)}$$

Donde: $p \equiv$ Densidad

$Vs \equiv$ Velocidad de ondas S (Ondas de corte)

$Vp \equiv$ Velocidad de ondas P (Ondas de compresión)

Ilustración 5. Ejemplo grafico del modulo de Rigidez.



Fuente. Alfonso Alvarez, Geofisica aplicada en los proyectos basicos de ingenieria civil, publicación tecnica No 229, Sanfandila, Qro, 2003.

2.3.3 Modulo de Young (E) . Se puede decir que todos los materiales son elasticos hasta cierto punto, el modulo de elasticidad puede calcularse para

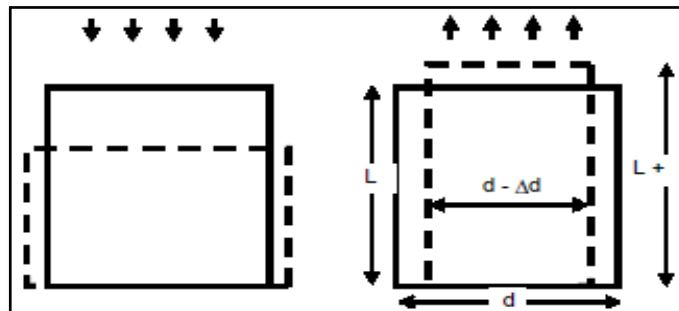
cualquier material. El modulo de Young es la relación entre el esfuerzo unitario y la deformación longitudinal unitaria, esto es para la compresion y tension respectivamente, y matematicamente se espresa mediante: [4]

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (7)$$

Donde: $\nu \equiv$ *Relacion de Poisson*

$G \equiv$ *Modulo de Rigidez.*

Ilustración 6. Ejemplo grafico del modulo Elastico



Fuente. Alfonso Alvarez, Geofisica aplicada en los proyectos basicos de ingenieria civil, publicación tecnica No 229, Sanfandila, Qro, 2003.

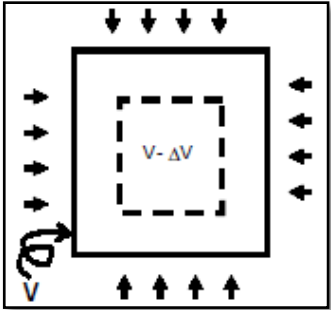
2.3.4 Modulo de Bulk (B) [4]. Es la relación entre la presión hidrostática y el cambio de volumen unitario, compresibilidad volumetrica; y se determina evaluando la siguiente expresión:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (8)$$

Donde: $\nu \equiv$ *Relacion de Poisson*

$E \equiv$ *Modulo de Young.*

Ilustración 7. Ejemplo grafico del modulo de Bulk



Fuente. Alfonso Alvarez, Geofisica aplicada en los proyectos basicos de ingenieria civil, publicación tecnica No 229, Sanfandila, Qro, 2003.

3. METODOLOGIA

Para el desarrollo del proyecto de investigación el cual busca complementar la información obtenida de los sondeos realizados en el lote ubicado en el municipio de Charta, Santander, y realizar el ensayo de refracción sísmico en el mismo lote, se divide el proceso en 5 fases, las cuales son

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Fase inicial en el proceso de investigación, la cual consiste en la recopilación de material bibliográfico donde se establecen los conceptos básicos para los estudios de refracción sísmica y los parámetros dinámicos de los suelos.

3.2 ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN

Esta fase corresponde al análisis y selección del material bibliográfico encontrado, donde se afianzan los conceptos generales de la aplicación del método, equipos y normas.

3.2.1 Métodos de exploración sísmica. Como las obras de ingeniería se apoyan en el suelo es importante conocer las características y propiedades del mismo, por eso se han desarrollado distintas técnicas o métodos de exploración, los cuales al ser realizados de forma cuidadosa, siguiendo los métodos y las normas establecidas deben brindar unos resultados confiables para la toma de decisiones en los distintos proyectos de ingeniería civil. En el campo de la geotecnia se conocen tres tipos de métodos de exploración como lo son:

Tabla 1. Clasificación de los métodos de exploración.

A. Directos	B. Semidirectos	C. Indirectos (Geofísicos):
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pozo a cielo abierto ✓ Pala posteadora ✓ Tubo Shelby ✓ Sondeo de penetración estándar ✓ Muestreo Denison 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Prueba de penetración estándar ✓ Método del cono 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Geo-sísmico ✓ Geo-eléctrico ✓ Gravimétrico ✓ Magneto-métrico

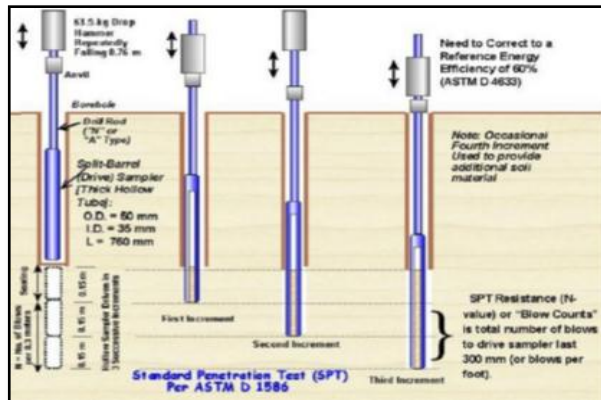
Para la investigación se utilizaron dos tipos de métodos (Sondeo de penetración estándar y ensayo de refracción sísmica), los cuales sirvieron de base para el análisis, comparación y complementación de información necesaria para el desarrollo del proyecto de vivienda Villa Suarez del municipio de Charta Santander.

A continuación se hace una breve descripción de los métodos aplicados.

3.2.1.1 Sondeo de penetración estándar [11] . El SPT (standard penetration test, ASTM D 1586) o ensayo de penetración estándar, es un tipo de prueba de penetración dinámica, que es empleado para realizar ensayos en terrenos que requiere realizar un reconocimiento geotécnico.

El ensayo SPT se realiza en el interior de sondeos durante la perforación, consiste en contar el número de golpes (N) que se necesitan para introducir dentro de un estrato de suelo, un toma muestras (cuchara partida hueca y cilíndrica) de 45 cm de largo, diámetro exterior de 51 mm e interior de 35m, que permite realizar tomas de muestra naturalmente alterada en su interior, a diferentes profundidades).

Ilustración 8. Descripción gráfica del ensayo SPT



Fuente. Ensayo de penetración estándar, Universidad Nacional de Perú.

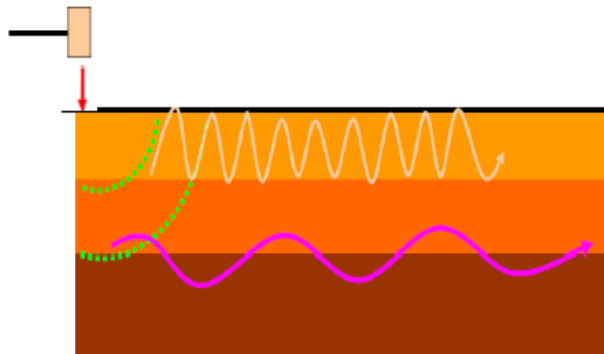
3.2.1.2 Ensayo de refracción sísmico. Con el método Geo sísmico, mediante la interpretación de resultados se pueden deducir propiedades mecánicas y la distribución de los materiales en el subsuelo, empleando las velocidades de las ondas de compresión y de corte que se transmiten a través de los materiales en el sub suelo y son registrados por geófonos localizados a lo largo de un tendido o línea de refracción, lo cual permite medir los tiempos de llegada de cada onda, generadas por el efecto de vibraciones producidas por la detonación de una carga o por el golpe en el terreno. Con la interpretación se pueden definir aproximadamente la geometría de la estratigrafía y extrapolar los resultados obtenidos por métodos directos. Con el método de refracción se puede deducir:

- A. Capacidad de los materiales
- B. Profundidad de contactos
- C. Espesor de estratos
- D. Módulos dinámicos:
 - Cortante
 - Young o elasticidad
 - Poisson

Ilustración 9. Localización de los geófonos para la línea de refracción



Ilustración 10. Esquema generación de ondas por un medio activo.



Fuente. Ingeoexploraciones.

3.3 LOCALIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO

Los métodos de exploración anteriormente mencionados fueron realizados sobre el área del lote localizado en el municipio de Charta, Santander, donde está proyectado la construcción de la urbanización Villa Suarez.

Ilustración 11. *Zona de estudio*



Ilustración 12. Vista general zona de estudio



Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

3.3.1 Descripción geográfica del municipio de Charta. El terreno es netamente montañoso formado por dos grandes ramales: la cordillera oriental de los Andes y una cordillera que escalona los puntos de la Mejora, Lavadores, Guarumales, Los Quemados, Las Cruces, Alto Grande y Boquerón que la separan de Bucaramanga, Tona y Vetas. Otra cordillera que la separa de California y Surata, empieza en el punto del Blanquizal, pasa por el Arbolito, el Codo, las Cruces y sigue marcando límite con Matanza, por los puntos de las Tablas, Ovejeras y

abejas hasta que termina sobre el río Surata. El río Charta atraviesa este municipio de oriente a occidente hasta llegar a unirse con el río Surata. [12]

3.3.2 Características geológicas y geotécnicas.

3.3.2.1 Depósitos aluviales (qal). Corresponden en su mayoría a depósitos de avenidas torrenciales, ya que la fuerte dinámica de los ríos y quebradas de la zona, facilitada por las abruptas pendientes, permiten el fácil desplazamiento de bloques de gran tamaño a lo largo de extensos recorridos, hasta que llegan a zonas bajas y relativamente más amplias, formando terrazas de espesor considerable que se modifican constantemente por la misma acción hídrica.

3.3.2.2 Geología Estructural. Regionalmente, la tectónica está determinada por una serie de fallas de gran longitud de tipo normal que muestran una dirección predominante NE- SW y NWSE y que tienen asociadas fallas satélites en todas las direcciones al igual que una serie de lineamientos claramente apreciados y que se reflejan en el grado de fracturamiento de las rocas aflorantes. Este modelo estructural controla el drenaje como se evidencia en varios tramos del Río Charta definido por la falla de su mismo nombre y al que se asocian fallas menores, igualmente las fallas de La Cristalina y Suratá (Municipio de Matanza, controlando el Río Suratá en límites con el Municipio de Charta) presentan la misma tendencia.

3.3.2.3 Falla del Río Charta. Estructura con dirección NW-SE, que se extiende por varios kilómetros, constituyéndose en el principal rasgo estructural dentro del Municipio de Charta; presenta movimiento compuesto de desplazamiento horizontal y vertical cortando rocas graníticas y granodioríticas y algunos sectores de rocas sedimentarias cretáceas, su trazo define el curso del Río Charta.

3.3.2.4 Falla La Cristalina. Estructura de tipo normal que se extiende por varios kilómetros en dirección NWSE, desplazada por fallas transversales en varios sitios. Pone en contacto rocas metamórficas ortonésicas y de la Formación Silgará, con rocas sedimentarias cretáceas. En el límite entre las veredas El Roble

y La Cristalina, esta estructura controla el cauce de la Quebrada La Cristalina, en el sector de la Vereda la Rinconada, disecta varios bloques de rocas sedimentarias mostrando desplazamientos entre ellos.

3.3.2.5 Lineamientos y fallas asociadas. Las rocas cretáceas que se encuentran preservadas en la zona son producto de un hundimiento de un gran bloque el cual presenta fuerte evidencia de la actividad tectónica mostrando un numeroso grupo de fallas normales de dirección predominante N -S, que ponen en contacto las diferentes unidades del registro cretáceo entre sí. A lo largo del área de estudio existen dos series de lineamientos, una, con dirección predominantemente NE-SW y la otra con dirección preferencial E-W, los cuales se aprecian en las rocas Pre-cretáceas, que comparativamente con las rocas cretáceas están menos afectadas.

3.3.2.6 Pliegues. Las estructuras de este tipo no son comunes en la zona; sin embargo se observan algunas en rocas del cretáceo inferior; en la Vereda El Roble. Existe un sinclinal alargado, cuyo eje presenta una dirección aproximada N-S y sus flancos están delimitados por fallas; igualmente se encuentra un anticlinorio de poca extensión cerca de la estructura anterior siguiendo la misma dirección.

4 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EXPLORACIÓN

4.1 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA (SPT) (ANEXO A)

Se realizaron sondeos a rotación y percusión en tramos de 50 centímetros de longitud realizando ensayos de penetración estándar SPT en cada uno de los tramos.

- Se realizaron 5 sondeos en total, a una profundidad de 6 metros.
- Ensayo (SPT) Norma ASTM D 1586, INVE 111.
- Se obtuvieron muestras en tubo partido
-

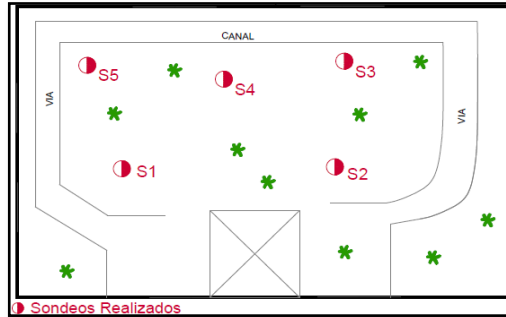
4.1.1 Localización de los sondeos

Ilustración 13. Vista sondeo 3.



Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S

Ilustración 14. Localización aprox. de los sondeos y el tendido sísmico , la línea azul representa el tendido sísmico



Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S

4.1.2 Resultados de los ensayos in Situ y en laboratorio

Tabla 2. Resumen ensayos SPT.

PROFUNDIDAD (m)	SONDEO				
	1	2	3	4	5
	N/SPT				
0.0 a 0.5	8	11	10	11	9
0.5 a 1.0	16	20	29	22	20
1.0 a 1.5	12	14	26	10	41
1.5 a 2.0	11	39	30	12	44
2.0 a 2.5	26	42	50	45	49
2.5 a 3.0	29	55	60	46	54
3.0 a 3.5	41	63	50	55	59
3.5 a 4.0	46	66	61	64	63
4.0 a 4.5	52	76	68	69	69
4.5 a 5.0	61	77	74	74	77
5.0 a 5.5	70	80	70	77	81
5.5 a 6.0	R	R	R	R	R

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S

Tabla 3. Resumen resultados ensayos de laboratorio a las muestra de suelo extraído.

Sondeo	Prof. (m)	W%	% Finos	% L.L.	% L.P.	% I. P.	Clasificación S.U.C.S.
1	1.5	31,4	35,4	N.P	N.P	N.P	SM
2	1.5	35,0	26,2	N.P	N.P	N.P	SM
2	3.0	19,9	19,9	N.P	N.P	N.P	SM
3	1.5	19,4	30,6	N.P	N.P	N.P	SM
3	3.5	21,8	31,7	N.P	N.P	N.P	SM
4	1.5	23,8	24,1	N.P	N.P	N.P	SM
4	2.5	31,3	30,4	N.P	N.P	N.P	SM
5	1.5	29,8	35,2	N.P	N.P	N.P	SM

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

De los resultados de los ensayos realizados en campo y en laboratorio a las muestras de suelo extraído, se determina un perfil estratigráfico típico de la zona de estudio el cual se presenta a continuación.

Ilustración 15. Este perfil estratigráfico es la muestra más representativa del material encontrado en los sondeos.

PROF. m		CLASIFICACION	DESCRIPCION DEL MATERIAL	W	GRANULOMETRIA			LIMITES			N			N
Inicio	Fin				USCS	% F	% S	% G	% L.L.	% L.P.	% I. P.	6"	12"	
0,00	0,50	SM	Suelo suelto compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, poco resistente color café y negro.	23,8	24,1	66,9	9,1	N.P	N.P	N.P	2	4	7	11
0,50	1,00										8	12	10	22
1,00	1,50										7	5	5	10
1,50	2,00										6	5	7	12
2,00	2,50	SM	Suelo Residual compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, resistente color gris.	31,3	30,4	67,4	2,2	N.P	N.P	N.P	21	22	23	45
2,50	3,00										23	24	22	46
3,00	3,50										24	26	29	55
3,50	4,00										30	32	32	64
4,00	4,50										32	34	35	69
4,50	5,00										35	36	38	74
5,00	5,50										38	38	39	77
5,50	6,00	40	42	R	R									

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

4.2 MÉTODO GEOFÍSICO

Para la ejecución de Estudio Geofísico se utilizó la Estación portátil de prospección sísmica GEODE, fabricado por la empresa GEOMETRICS, el cual contiene 24 canales los cuales pueden espaciarse a lo largo del tendido o línea de refracción cada 10m, pero para nuestro ensayo se utilizó una distancia entre canales de 3m.

Para la ejecución del estudio geofísico se efectuaron 4 fases en las cuales se realizaron las siguientes actividades.

Ilustración 16. Sismógrafo utilizado para la ejecución de las líneas de refracción Sísmica



Ilustración 17.; Geófonos de 14 Hertz (rojos) y de 4.5 Hertz (Azules) utilizados para la línea de Refracción Sísmica.



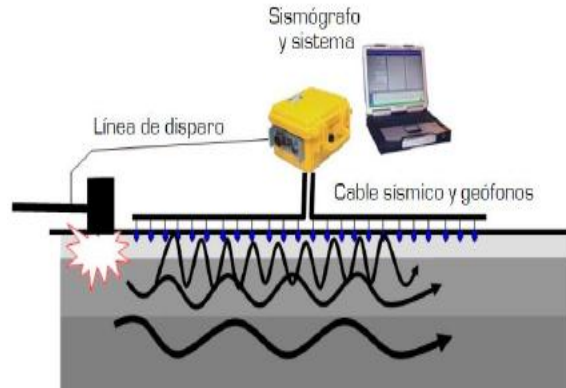
4.2.1 Reconocimiento a la zona de estudio.. En esta etapa o fase, se hizo un reconocimiento del sitio de estudio, localizando los puntos donde se realizaron los sondeos a percusión con el fin de poder complementar la información obtenida mediante ese método, además es importante que en el momento de realizar el registro de los datos de refracción se tenga poco ruido y tránsito u algún otro factor que genere alteraciones para el registro de resultados.

4.2.2 Localización de la estación de adquisición de datos. En esta etapa se dispone a ubicar en el lote la estación donde quedara localizado el sismógrafo, el equipo para la adquisición de datos (computador) y la persona encargada de indicar en momento en que se debe hacer el golpe a la platina para generar las ondas sísmicas mediante un impulso, dado el caso en que la muestra presente alteraciones por ruidos generados en el momento del impacto a la platina se deberá repetir la muestra.

Ilustración 18. En la imagen se observa la estación de adquisición de datos donde se identifica el sismógrafo, en este se conectan cada uno de los elementos usados para la toma de datos.



Ilustración 19. Conexión característica de los componentes empleados en los ensayo de Refracción Sísmica y Ondas Superficiales.



Fuente. Ingeoexploraciones

4.2.3 Conexión del tendido sísmico

Ya establecido la estación de adquisición de datos y por donde se extenderá el tendido sísmico, se usó una cinta métrica la cual se pone sobre la superficie del suelo con el fin de localizar cada geófono a una distancia establecida para la toma de datos, puestos los geófonos en el suelo se dispone a extender el Multicable el cual conecta los geófonos al sismógrafo, en este caso el GEODE. (En el siguiente link se puede observar con más detalle la conexión del equipo: <https://www.youtube.com/watch?v=kcM7ZohzkMI&list=PLSmJoGVkw2ozswjDZmHg8H-VfQcKw-RJe>, o en YouTube con el siguiente nombre “Seismic Training 1-0”)

Ilustración 20. Localización de los geófonos.



Ilustración 21. Multicable para la conexión de los geófonos.



4.2.4 Adquisición de Datos. Se realizó el tendido o línea de refracción con 24 geófonos con una separación de 3 metros entre cada uno, para la cual se usaron geófonos de 4.5 Hertz para la toma de datos de ondas superficiales y geófonos de 14 Hertz para el ensayo de refracción. Se georreferenciaron los geófonos 1 y 24 y se hizo un levantamiento topográfico a lo largo del tendido, estableciendo un perfil más detallado.

Tabla 4. Localización geófonos 1 y 24, coordenadas respecto al origen Bogotá.

Geófono	X	Y	Z
1	1'296.88	1'112.874	2040 m
24	1'296.820	1'122.866	2036 m

Fuente. Propia.

Para la toma de datos se realizaron 3 ensayos:

Tabla 4. Numero de golpes y parámetros usados para la toma de datos con el software Geometrics Seismodule Controller. *(En el Anexo B se establece el proceso para hacer el ingreso de los parámetros para la toma de datos en cada uno de los ensayos realizados)*

Ensayo	Refracción	MASW 1D	MAM
Numero de golpes	9	2	Ambiente
Record Length	0.2 seg	2 seg	32 seg
Sample Intervale	62500 us	0.500 ms	2 ms
Preamp Gains	24 Low	36 Low	36 High
Autostack	ON	ON	ON
Unstack Delay	15 seg	15 seg	0 seg
Trigger	OFF Estándar	OFF Estándar	20 seg
Auto Save	OFF	OFF	ON

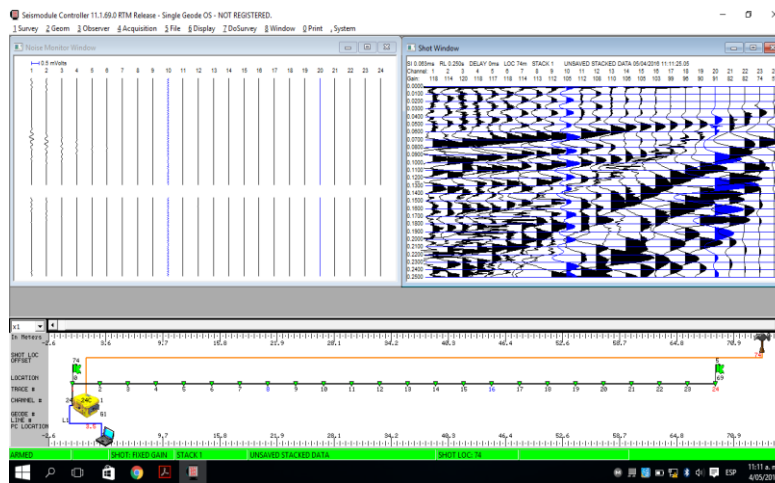
Tabla 5. Localización de los puntos de tiro.

LOCALIZACION DE PUNTO DE TIRO LS1			
PUNTO DE TIRO	LOCALIZACION (metros)	PROFUNDIDAD CAPA 2 (metros)	PROFUNDIDAD CAPA 3 (metros)
1	-15	0	N/A
2	-5	0	N/A
3	10.5	2.7	N/A
4	22.5	2.5	N/A
5	34.5	2.38	N/A
6	46.5	2.31	N/A
7	55.5	2.27	N/A
8	74	0	N/A
9	84	0	N/A

Ilustración 22. Generación de las ondas sísmicas por medios impulsivos.



Ilustración 23. Registro de datos generados por una fuente de energía impulsiva en campo.



4.3 PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN.

Con los datos adquiridos en campo, se usó el Software de inversión y modelización SEISMAGER 2D y SEISMAGER/SW, de la compañía Geometrics Inc. (*En el anexo C se detalla el procedimiento del análisis de los datos*), como resultado se obtuvieron:

Ilustración 16. Modelo 1. Resultado del análisis del ensayo de refracción sísmica, representado en un modelo simplificado de dos capas. (Elevation: msnm; Distance: distancia horizontal)

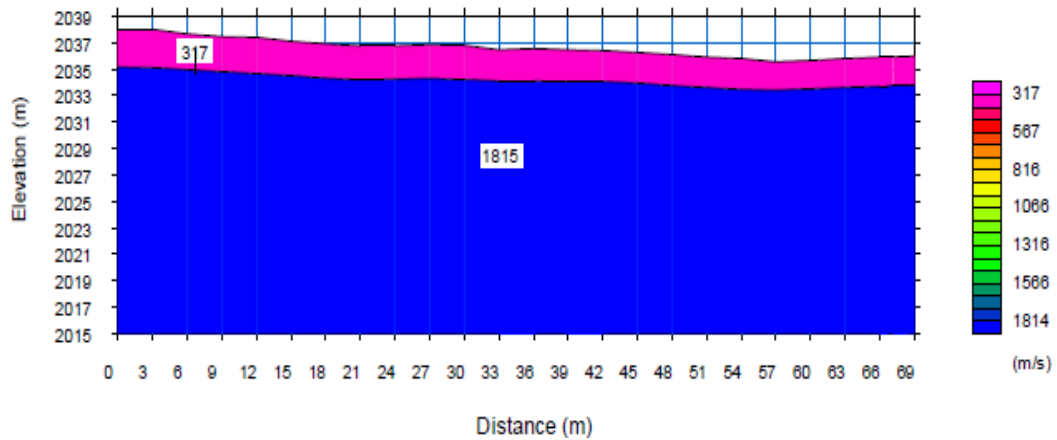
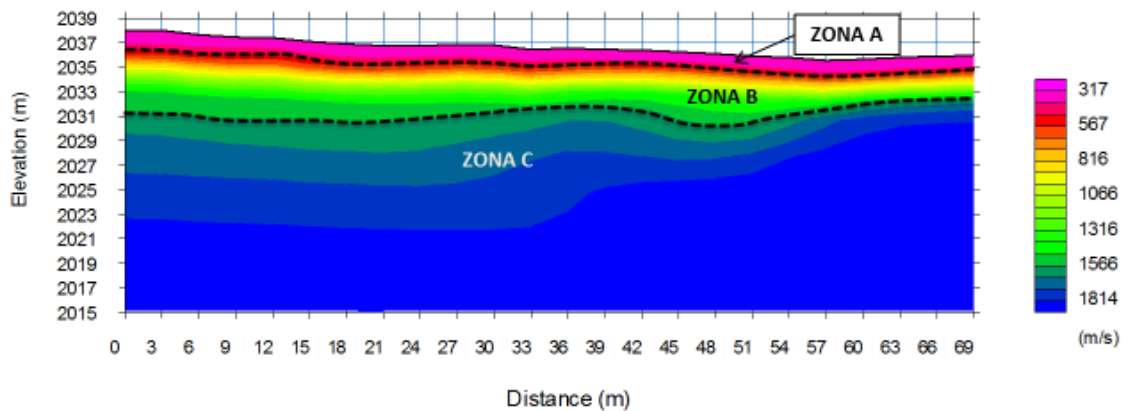
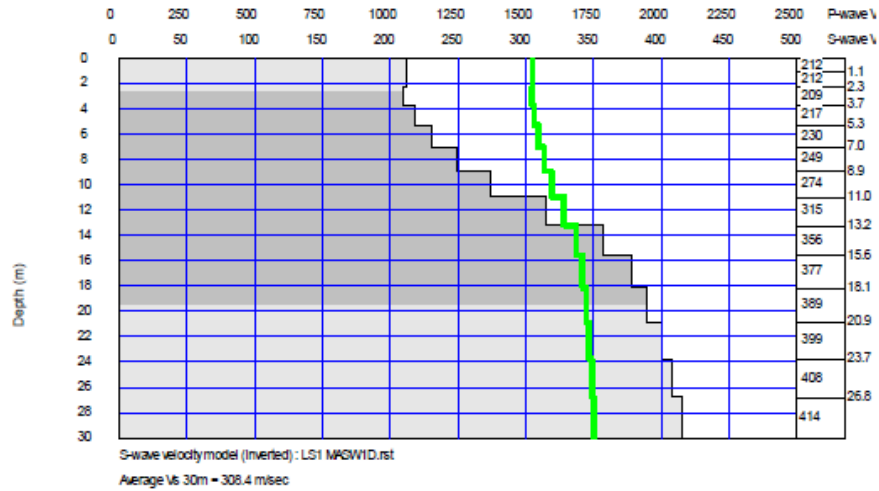


Ilustración 17. Modelo 2. Resultado del análisis del ensayo de refracción sísmica, representado en un modelo de Tomografía 2D (Elevation: msnm; Distance: distancia horizontal).



Grafica 1. Promedio de velocidades de ondas superficiales.



Conocidas las velocidades de corte (V_s), se calculan las compresionales (V_p) y las densidades (ρ) de los diferentes estratos que componen el subsuelo (los cuales se pueden obtener de ensayos de laboratorio o a partir de las velocidades compresionales) y dadas las relaciones matemáticas expresadas, a continuación es posible calcular los módulos de Elasticidad (E), de Corte máximo (G), de deformación Volumétrica (K).

Tabla 6. Ecuaciones usadas para el cálculo de los parámetros dinámicos del suelo a partir de la gráfica de velocidades de ondas S, V_s .

Relación de Poisson	$v = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2} \quad (3)$
Velocidad de onda P	$V_p = 1.11V_s + 1290 \quad (\text{Kitsunozaki, 1990}) \quad (4)$
Densidad (ρ)	$\rho = 1.2475 + 0.399V_p - 0.026V_p^2 \quad (\text{Ludwig, 1970}) \quad (5)$
Modulo de Rigidez (G)	$G = \rho V_s^2 \quad (6)$
Modulo de Young (E)	$E = 2G(1 + v) \quad (7)$
Modulo de Bulk (K)	$K = \frac{E}{3(1-2v)} \quad (8)$

Tabla 7. Calculo de velocidades de ondas S, ondas P y los parámetros dinámicos del sub-suelo a partir de las ecuaciones de la tabla 7.

TABLA DE DATOS - MASW 1D - LS1								
Prof. (m)	S-wave velocity (m/s)	P-wave velocity (m/s)	Density (g/cm ³)	N	Relacion de Poisson ν	Módulo de Corte G (Ton/m ²)	Módulo de Elasticidad Ed (Ton/m ²)	Deformación K (Ton/m ²)
0.00	212.46	1525.84	1.80	12.15	0.25	81.077	202.693	135.129
1.07	212.27	1525.62	1.80	12.11	0.25	80.927	202.316	134.878
2.31	209.28	1522.30	1.79	11.58	0.25	78.613	196.532	131.021
3.71	218.00	1531.98	1.80	13.18	0.25	85.449	213.622	142.415
5.27	230.27	1545.60	1.80	15.70	0.25	95.574	238.936	159.290
7.01	249.71	1567.18	1.81	20.32	0.25	112.815	282.037	188.025
8.90	274.27	1594.44	1.82	27.39	0.25	136.750	341.875	227.916
10.96	315.28	1639.96	1.83	42.69	0.25	182.130	455.326	303.550
13.19	356.99	1686.26	1.85	63.41	0.25	235.345	588.363	392.242
15.58	377.90	1709.47	1.85	76.02	0.25	264.762	661.906	441.271
18.13	389.54	1722.39	1.86	83.73	0.25	281.924	704.811	469.874
20.85	399.81	1733.79	1.86	90.96	0.25	297.557	743.893	495.929
23.74	408.24	1743.15	1.86	97.21	0.25	310.716	776.791	517.861
26.79	415.00	1750.65	1.87	102.43	0.25	321.481	803.703	535.802
36.43	416.77	1752.61	1.87	103.83	0.25	324.338	810.844	540.563

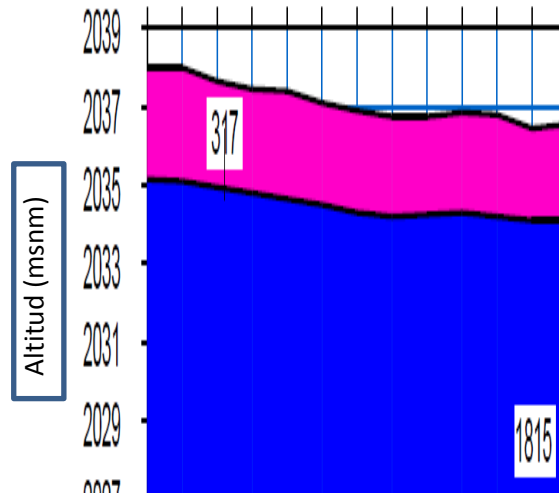
5 CONCLUSIONES

Con el análisis de los datos obtenidos en el ensayo de refracción sísmica, se determina un perfil típico de la zona de estudio identificado en el modelo 1, se observa que en cada uno de los métodos aplicados para la exploración del suelo se encontraron dos estratos de suelo identificados por un color representativo en cada perfil, la primera capa con un espesor promedio de 2 metros, y la segunda capa, como se observa en el modelo 1 hasta los 6 metros de profundidad, es otro estrato homogéneo, resultado esperado ya que era una de las hipótesis establecidas al momento de realizar el tendido sísmico, pues este se hizo lo más aproximado a la ubicación de los sondeos 3, 4 y 5.

Ilustracion 15. Perfil típico

PROF. m		CLASIFICACION		
Inicio	Fin			USCS
0,00	0,50			SM
0,50	1,00			
1,00	1,50			
1,50	2,00			
2,00	2,50			SM
2,50	3,00			
3,00	3,50			
3,50	4,00			
4,00	4,50			
4,50	5,00			
5,00	5,50			
5,50	6,00			

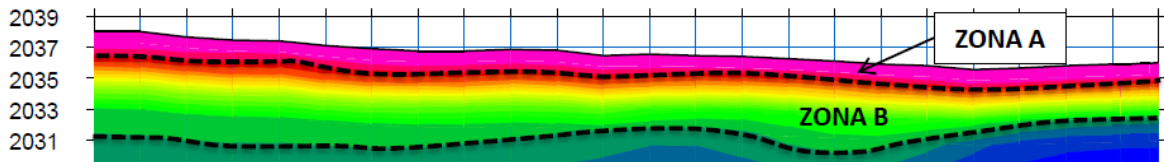
Modelo 1. Perfil del analisis de refracción.



En el análisis de datos, a partir del modelo 1, se hizo un modelo de tomografía en el cual se identifican con más detalle las velocidades de onda a medida que aumenta la profundidad, se establece en este modelo de tomografía la profundidad de basamento, identificada en la parte inferior de la zona B. Como se puede observar no es una profundidad homogénea, pues esta varía desde los 3.4

metros hasta los 6.8 metros de profundidad, debido a la fracturación, la meteorización y la actividad sísmica en la zona del municipio de Charta.

Ilustración 18. Modelo 2. Tomografía 2D



Del análisis de datos registrados en el ensayo de ondas superficiales, se establece la gráfica 1, en la cual se obtienen las velocidades de ondas de corte Vs, la cuales junto con el conjunto de ecuaciones de la tabla 7 nos permite determinar los parámetros dinámicos del suelo, parámetros complementarios a la información registrada en los resultados de los sondeos STP, con los cuales se obtuvieron los parámetros mecánicos del suelo.

TABLA DE DATOS - MASW 1D - LS1								
Depth (m)	S-wave velocity (m/s)	P-wave velocity (m/s)	Density (g/cm ³)	N	Relacion de Poisson v	Módulo de Corte G (Ton/m ²)	Módulo de Elasticidad Ed (Ton/m ²)	Deformación K (Ton/m ²)
0.00	212.46	1525.84	1.80	12.15	0.25	81.077	202.693	135.129
1.07	212.27	1525.62	1.80	12.11	0.25	80.927	202.316	134.878
2.31	209.28	1522.30	1.79	11.58	0.25	78.613	196.532	131.021
3.71	218.00	1531.98	1.80	13.18	0.25	85.449	213.622	142.415
5.27	230.27	1545.60	1.80	15.70	0.25	95.574	238.936	159.290
7.01	249.71	1567.18	1.81	20.32	0.25	112.815	282.037	188.025

Se determina el perfil del suelo a partir de la clasificación establecida en la norma NSR-10 (tabla A.2.4-1), esta clasificación se hace con las velocidades de ondas de corte registradas a una profundidad aproximada a los 6 metros, la cual se encuentra entre los 230.27 m/s y 249.71 m/s, velocidades que cumplen con los parámetros establecidos para perfiles de suelo tipo D, resultado similar al obtenido por el método de Sondeos STP (Ver anexo A).

Tabla 8. Clasificación de los suelos de acuerdo a la NSR-10 tabla A.2.4-1.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{V}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s $> \bar{V}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s $> \bar{V}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s $> \bar{V}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) $> \bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)

Aunque se obtuvieron resultados similares en cada uno de los métodos aplicados, y que los métodos geofísicos, en este caso el ensayo de refracción sísmica y ondas superficiales, nos permite hacer un análisis más profundo y en mayor extensión, no dejan de ser métodos complementarios a los métodos tradicionales en los cuales se extraen muestras de material.

Cabe resaltar que los métodos geofísicos como el de refracción sísmica es una herramienta con la cual se puede verificar de una manera rápida la estratigrafía del sub-suelo, determinar por medio del análisis de datos una tomografía en la cual se puede de una manera más detallada observar las capas estratigráficas y así determinar la profundidad de basamento, y con el ensayo de ondas superficiales determinar las propiedades dinámicas del suelo, siendo este último método de gran importancia ya que de acuerdo a la norma NSR-10 para clasificar un perfil de suelo, son las velocidades de ondas Vs el primer parámetro para determinar el tipo de perfil.

6. REFERENCIA

[1] Citado el 16 de abril de 2016, disponible en

<http://ingeniociivil.blogspot.com.co/>

[2] Lineamientos Técnicos para Factibilidad, SIAPA, febrero de 2014.

[3] Citado el 16 de abril de 2016, disponible en

<http://www.osso.org.co/docu/tesis/2001/comportamiento/refraccion.pdf>

[4] Geofísica aplicada en los proyectos de ingeniería civil, Alfonso Alvares, Publicación Técnica 209, Sanfandila, Qro 2003

[5] Citado el 16 de abril, disponible en <http://www.fisic.ch/cursos/primeromedio/refracci%C3%B3n-de-la-luz-y-ley-de-snell/>

[6] Citado el 16 de abril, disponible en http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3236/html/21_ndice_de_refraccin.html

[7] Citado en 16 de abril de 2016, disponible en <http://fisicamoderna.jimdo.com/%C3%B3ptica/ley-de-snell/>

[8] González García, José Alberto, (1996): Tesis “Principios de Geofísica Exploratoria, Su Aplicación en los Estudios de Campo Geotérmico de Ahuachapán”, U.E.S., San Salvador, El Salvador

[9] Citado el 16 de abril de 2016, disponible en:

<http://www.esmijovi.com/descargas/ondas2.pdf>

[10] Ing Jorge E. Alva H, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Disponible en <https://es.scribd.com/doc/35684287/Dinamica-de-Suelos>

[11] Citado el 16 de abril de 2016, Norma ASTM D 1586, disponible en https://www.academia.edu/5346267/ENSAYO_DE_PENETRACION_ESTANDAR_Standard_Penetration_Test_ASTM

[12] Citado el 16 de abril de 2016, disponible en http://www.charta-santander.gov.co/informacion_general.shtml

7. BIBLIOGRAFÍA

Philip Keary, Michael Brooks, Ian Hill An Introduction to Geophysical Exploration 2002, 3rd Edition, Blackwell Science

W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Sheriff Applied Geophysics 1990, 2nd Edition, CAMBRIDGE

H. R. Burger, A.F. Sheehan, C. H. Jones Introduction to Applied Geophysics 2006, NORTON & Company

Dobrin, M. and Savit, C.H. 1988. Introduction to Geophysical Prospecting, 4th Ed: McGraw Hill

Norma ASTM – D5777

Norma NRS-10 Título H.

BRAJA DAS. (2001). PRINCIPIOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES. Thomson Learning

SeisImager/2D, Software para la Interpretation, Proceso y Modelado de Refracción, Manual version 3.3, de Geometrics Inc.

SeisImager/SW software para análisis de datos de ondas superficiales, manual, de Geometrics Inc.

ANEXOS

ANEXO A PROCEDIMIENTO

A.1. Ensayos realizados en campo

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados en el sitio: Ensayos de penetración estándar SPT

Se realizaron ensayos de penetración estándar utilizando la norma ASTM D 1586, equivalente a la norma I.N.V.E. 111.

- Peso del martillo: 135 libras.
- Altura de caída: 78 centímetros.
- Penetración: 3 intervalos de 15 centímetros cada uno (6”).
- N de diseño: Sumatoria de los golpes de los últimos 30 centímetros (12”).
- Diámetro exterior del tubo: 50.8 mm.
- Diámetro interior del muestreador en la punta: 34.93 mm.
- Longitud del tubo: 75 centímetros.
- Sistema de hincado: Malacate y polea.
- Motor del equipo: B & S 16 HP.
- Rechazo: Más de 30 golpes para 15 centímetros (6”).
- Tipo de muestras obtenidas: Muestras en tubo partido.

Tabla A1. Resultado de los ensayos SPT.

PROFUNDIDAD (m)	SONDEO				
	1	2	3	4	5
	N/SPT				
0.0 a 0.5	8	11	10	11	9
0.5 a 1.0	16	20	29	22	20
1.0 a 1.5	12	14	26	10	41
1.5 a 2.0	11	39	30	12	44
2.0 a 2.5	26	42	50	45	49
2.5 a 3.0	29	55	60	46	54
3.0 a 3.5	41	63	50	55	59
3.5 a 4.0	46	66	61	64	63
4.0 a 4.5	52	76	68	69	69
4.5 a 5.0	61	77	74	74	77
5.0 a 5.5	70	80	70	77	81
5.5 a 6.0	R	R	R	R	R

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

A.2 Ensayos realizados en laboratorio

Se extraen muestras del suelo, los cuales son llevados al laboratorio para realizarle ensayos para determinar el perfil estratigráfico de cada sondeo.

Tabla A2. Resumen ensayos realizados a las muestras de suelo extraído.

Ensayo	Norma	No. de ensayos
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422-63 AASHTO T88 I.N.V.E. 123	8
Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) en suelo, roca y mezcla de suelo agregado	ASTM D 2216 I.N.V.E. 122	8

Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	ASTM D 4318 – AASHTO T 89-90 I.N.V.E. 126	8
Corte directo drenado	ASTM D 3080 – AASHTO T 236 I.N.V.E. 154	1
Clasificación de suelos	ASTM D 2487	4

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

Tabla A3. Resultados de los ensayos realizados en laboratorio.

Sondeo	Prof. (m)	W%	% Finos	% L.L.	% L.P.	% I. P.	Clasificación S.U.C.S.
1	1.5	31,4	35,4	N.P	N.P	N.P	SM
2	1.5	35,0	26,2	N.P	N.P	N.P	SM
2	3.0	19,9	19,9	N.P	N.P	N.P	SM
3	1.5	19,4	30,6	N.P	N.P	N.P	SM
3	3.5	21,8	31,7	N.P	N.P	N.P	SM
4	1.5	23,8	24,1	N.P	N.P	N.P	SM
4	2.5	31,3	30,4	N.P	N.P	N.P	SM
5	1.5	29,8	35,2	N.P	N.P	N.P	SM

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

Dónde: W = humedad

% Finos = pasantes del tamiz ASTM 200

L.L. = Límite Líquido

L.P. = Límite Plástico

I.P. = Índice Plástico

S.U.C.S. = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

A.3 Determinación del perfil estratigráfico típico de la zona

Con los resultados de los ensayos realizados en laboratorio de determina un perfil estratigráfico típico de la zona de estudio.

Tabla A4. Perfil típico de la zona de estudio.

PROFUNDIDAD (mts)		SUELO	LIMITACIONES GEOTÉCNICAS
DESDE	HASTA		
0.0	Variable de 1.00 a 2.00	Suelo suelto compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, poco resistente color marrón y gris.	Suelto. Poco Competentes para la cimentación de estructuras.
Variable de 1.00 a 2.00	Variable de 2.00 hasta 6.00	Suelo Residual compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, resistente color gris.	Residual. Competentes para la Cimentación de estructuras.

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

A.3.1 Perfiles estratigráficos de la zona de estudio.

Se presentan a continuación los perfiles estratigráficos obtenidos

Ilustración A1. Perfil estratigráfico sondeo 1.

PROYECTO :		ESTUDIO GEOTECNICO URBANIZACION VILLA SUAREZ MUNICIPIO DE CHARTA DEPARTAMENTO DE SANTANDER.						SONDEO:		1						
LOCALIZACION:		SECTOR FRONTAL DEL SITIO						PROF:		0,00- 6,00metros						
PROF. m		CLASIFICACION			DESCRIPCION DEL MATERIAL	W	GRANULOMETRIA			LIMITES			N			
Inicio	Fin			USCS			% F	%S	%G	% L.L.	% L.P.	% I. P.	6"	12"	18"	N
0,00	0,50			SM	Suelo suelto compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, poco resistente color marrón y gris.	31,4	35,4	54,3	10,3	N.P	N.P	N.P	1	3	5	8
0,50	1,00												5	7	9	16
1,00	1,50												6	6	6	12
1,50	2,00				5	6	5	11								
2,00	2,50			SM	Suelo Residual compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, resistente color gris con vetas café.								4	12	14	26
2,50	3,00												13	14	15	29
3,00	3,50												16	20	21	41
3,50	4,00												22	22	24	46
4,00	4,50												23	25	27	52
4,50	5,00												27	29	32	61
5,00	5,50												32	34	36	70
5,50	6,00												36	38	R	R

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

Ilustración A2. Perfil estratigráfico sondeo 2.

PROYECTO :		ESTUDIO GOIETECNICO URBANIZACION VILLA SUAREZ MUNICIPIO DE CHARTA DEPARTAMENTO DE SANTANDER.						SONDEO:		2						
LOCALIZACION:		SECTOR FRONTAL DEL SITIO						PROF:		0,00- 6,00 metros						
PROF. m		CLASIFICACION			DESCRIPCION DEL MATERIAL	W	GRANULOMETRIA			LIMITES			N			
Inicio	Fin			USCS			% F	% S	% G	% L.L.	% L.P.	% I. P.	6"	12"	18"	N
0,00	0,50			SM	Suelo Suelto compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, poco resistente color gris con presencia de raíces.	35,0	26,2	62,7	11,2	N.P	N.P	N.P	1	5	6	11
0,50	1,00												9	13	7	20
1,00	1,50												6	7	7	14
1,50	2,00			SM	Suelo Residual compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, resistente color gris.	19,9	19,9	65,1	15,0	N.P	N.P	N.P	7	17	22	39
2,00	2,50												22	17	25	42
2,50	3,00												25	26	29	55
3,00	3,50												30	31	32	63
3,50	4,00												31	34	32	66
4,00	4,50												33	37	39	76
4,50	5,00												39	39	38	77
5,00	5,50												39	40	40	80
5,50	6,00				41	42	R	R								

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

Ilustración A3. Perfil estratigráfico sondeo 3.

PROYECTO :		ESTUDIO GOIETECNICO URBANIZACION VILLA SUAREZ MUNICIPIO DE CHARTA DEPARTAMENTO DE SANTANDER.						SONDEO:		3						
LOCALIZACION:		SECTOR DERECHO DEL SITIO						PROF:		0,00- 6,00 metros						
PROF. m		CLASIFICACION			DESCRIPCION DEL MATERIAL	W	GRANULOMETRIA			LIMITES			N			
Inicio	Fin			USCS			% F	% S	% G	% L.L.	% L.P.	% I. P.	6"	12"	18"	N
0,00	0,50				Suelo Residual compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, resistente color marrón con presencia de raíces.	19,4	30,6	54,2	15,3	N.P	N.P	N.P	2	5	5	10
0,50	1,00												7	17	12	29
1,00	1,50												15	16	10	26
1,50	2,00												12	13	17	30
2,00	2,50												21	22	28	50
2,50	3,00				21,8	31,7	57,9	10,4	N.P	N.P	N.P	33	30	30	60	
3,00	3,50											21	22	28	50	
3,50	4,00											29	30	31	61	
4,00	4,50											32	33	35	68	
4,50	5,00											35	36	38	74	
5,00	5,50											39	39	40	79	
5,50	6,00											41	42	R	R	

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

Ilustración A4. Perfil estratigráfico sondeo 4.

PROYECTO :		ESTUDIO GOIETECNICO URBANIZACION VILLA SUAREZ MUNICIPIO DE CHARTA DEPARTAMENTO DE SANTANDER.						SONDEO:		4													
LOCALIZACION:		SECTOR CENTRAL DEL SITIO						PROF:		0,00- 6,00 metros													
PROF. m		CLASIFICACION			DESCRIPCION DEL MATERIAL	W	GRANULOMETRIA			LIMITES			N			N							
Inicio	Fin			USCS			% F	%S	%G	% L.L.	% L.P.	% I. P.	6"	12"	18"								
0,00	0,50			SM	Suelo suelto compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, poco resistente color café y negro.	23,8	24,1	66,9	9,1	N.P	N.P	N.P	2	4	7	11							
0,50	1,00												8	12	10	22							
1,00	1,50												7	5	5	10							
1,50	2,00												6	5	7	12							
2,00	2,50			SM	Suelo Residual compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, resistente color gris.	31,3	30,4	67,4	2,2	N.P	N.P	N.P	21	22	23	45							
2,50	3,00												23	24	22	46							
3,00	3,50												29,8	35,2	61,1	3,7	N.P	N.P	N.P	24	26	29	55
3,50	4,00												30	32	32	64							
4,00	4,50												32	34	35	69							
4,50	5,00												35	36	38	74							
5,00	5,50												38	38	39	77							
5,50	6,00												40	42	R	R							

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

Ilustración A5. Perfil estratigráfico sondeo 5.

PROYECTO :		ESTUDIO GOIETECNICO URBANIZACION VILLA SUAREZ MUNICIPIO DE CHARTA DEPARTAMENTO DE SANTANDER.						SONDEO:		4						
LOCALIZACION:		SECTOR IZQUIERDO DEL SITIO						PROF:		0,00- 6,00 metros						
PROF. m		CLASIFICACION			DESCRIPCION DEL MATERIAL	W	GRANULOMETRIA			LIMITES			N			N
Inicio	Fin			USCS			% F	%S	%G	% L.L.	% L.P.	% I. P.	6"	12"	18"	
0,00	0,50			SM	Suelo Residual compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, resistente color café y negro.	29,8	35,2	61,1	3,7	N.P	N.P	N.P	2	2	7	9
0,50	1,00												5	7	13	20
1,00	1,50												15	19	22	41
1,50	2,00												21	21	23	44
2,00	2,50			SM	Suelo Residual compuesto por arena limosa húmeda, algo permeable, resistente color gris.								22	24	25	49
2,50	3,00												24	26	28	54
3,00	3,50												26	29	30	59
3,50	4,00												30	31	32	63
4,00	4,50												33	33	36	69
4,50	5,00												37	38	39	77
5,00	5,50												40	40	41	81
5,50	6,00												40	42	R	R

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S.

A.4 Parámetros Mecánicos.

Para determinar los parámetros mecánicos del suelo, se realiza un ensayo de corte directo, dando como resultado

Tabla A5. Resultados ensayo de corte directo

UBICACIÓN	ANGULO DE FRICCIÓN grados	COHESION Kg/m ²
Centro del Sitio	18.0	1602.6

Fuente. Ingeniería y Suelos S.A.S

Conocido el ángulo de fricción se determinan los parámetros mecánicos a partir de las siguientes ecuaciones:

Tabla A6. Parámetros mecánicos del suelo, calculados a partir del ángulo de fricción.

Parámetro	Ecuación	Valor parámetro
Angulo de fricción ϕ	18	18
Cohesión	1602.6	1602.6
Coeficiente de presión en reposo	$Ko = 1 - \text{sen}\phi$	0,69
Coeficiente de presión activa	$Ka = (1 - \text{sen}\phi)/(1 + \text{sen}\phi)$	0,53
Coeficiente de presión pasiva	$Kp = (1 + \text{sen}\phi)/(1 - \text{sen}\phi)$	1,89
Coeficiente de Balastro (Kg/Cm3)	$Ks = \frac{N}{5.5}$	4,73

A.5 Parámetros Sísmicos.

De acuerdo a la norma NSR-10, título A se determinan los parámetros sísmicos y el perfil del suelo.

Tabla A7. Parámetros sísmicos y perfil del suelo según NSR-10, título A.

Parámetros	
Aa	0,25
Av	0,25
Fa	1,3
Fv	1,9
T0	0,1462
Tc	0,7015
Tl	4,5600
Perfil de suelos	D

ANEXO B PROCEDIMIENTO TOMA DE DATOS

En el presente anexo se establece el proceso para el ingreso de los parámetros usados en la toma de datos para los ensayos de refracción sísmica, MASW 1D y MAM con el software “Geometrics Seismodule Controller” de la compañía Geometrics Inc.

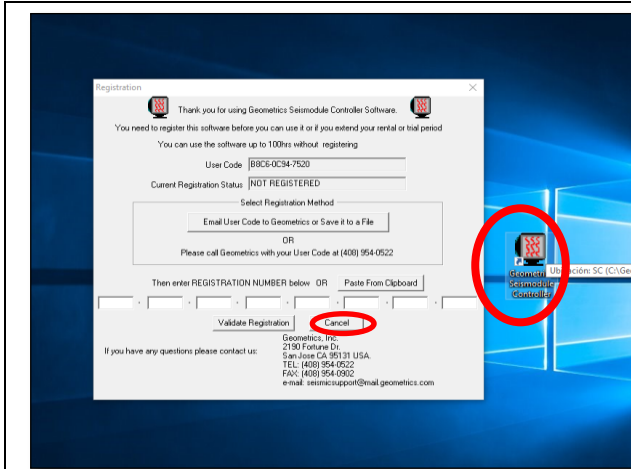


Ilustración B1. En la imagen se ilustra el icono del software para la toma de datos, como no se cuenta con la licencia, solo se le da clic en el botón cancel.

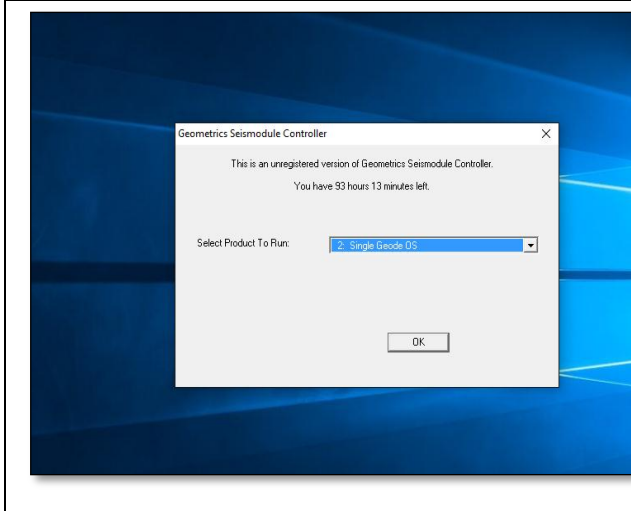


Ilustración B2. Seleccionar la opción 2 (Single Geode OS).

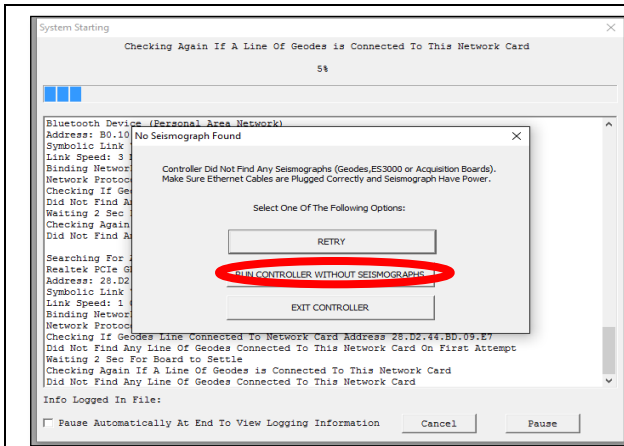


Ilustración B3. Seleccionar la opción RUN CONTROLLER WHITOUT SEISMOGRAPHS, a continuación saldrá un cuadro de dialogo, clicar la opción aceptar.

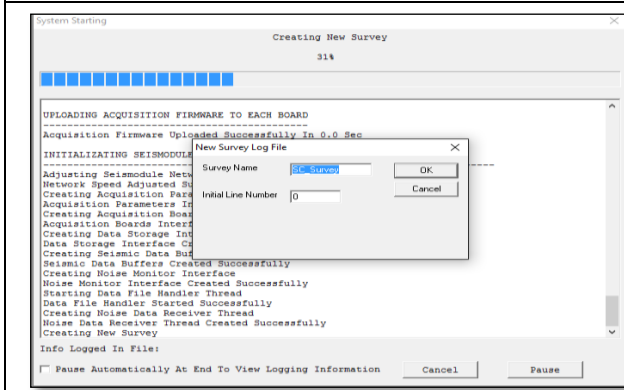


Ilustración B4. En este cuadro se define el nombre del archivo y el número de línea.

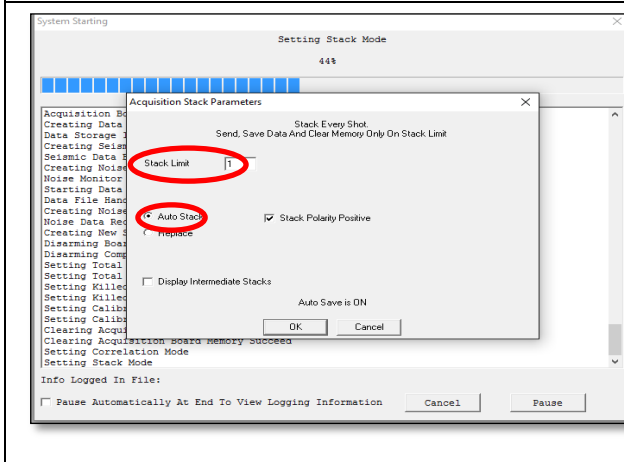


Ilustración B5. En este cuadro se activa la opción Auto Stack, Stack limit se establece como 1.

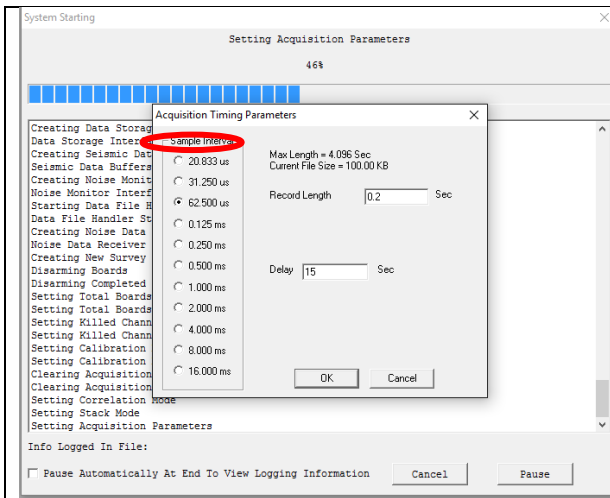


Ilustración B6. En el cuadro que se muestra se establecen los parámetros Sample Interval, Record Length y Delay.

Ensayo	Sam ple Inter val	Recor d Lengt h	Del ay
Refracción	62.50 0 us	0.2 sec	15 sec
MASW 1D	0.500 ms	2 sec	15 sec
MAM	2 ms	32 sec	0 sec

Tabla 1. Parámetros usados para los ensayos realizados en campo.

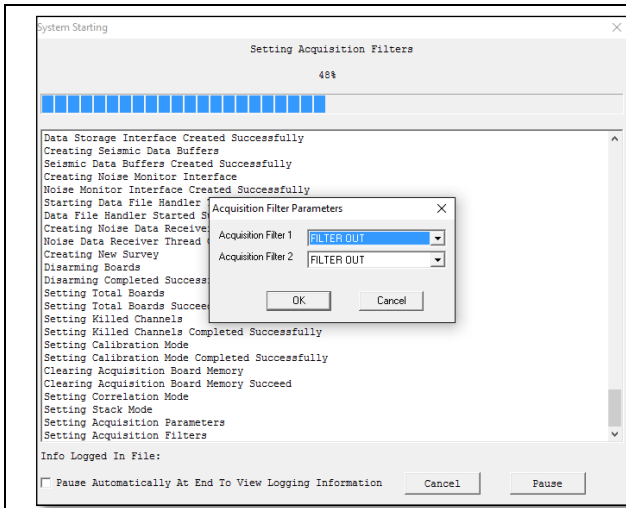


Ilustración B7. Aquí se dejan estos parámetros por defecto.

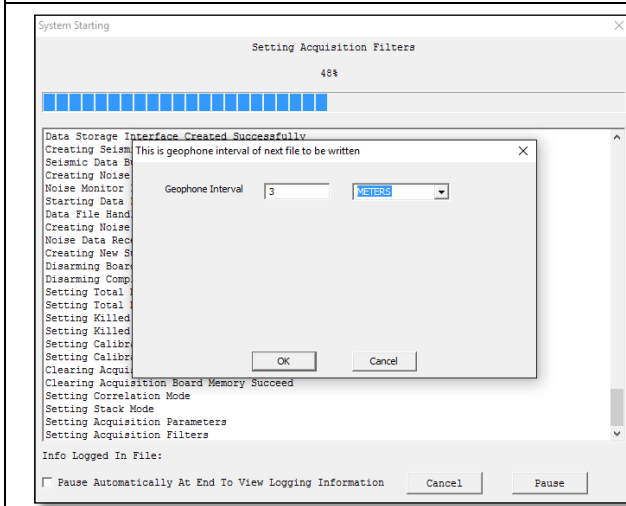


Ilustración B8. En este cuadro se establece la separación entre cada geófono y las unidades, en nuestro caso se hizo el tendido con una separación entre geófonos cada 3 metros.

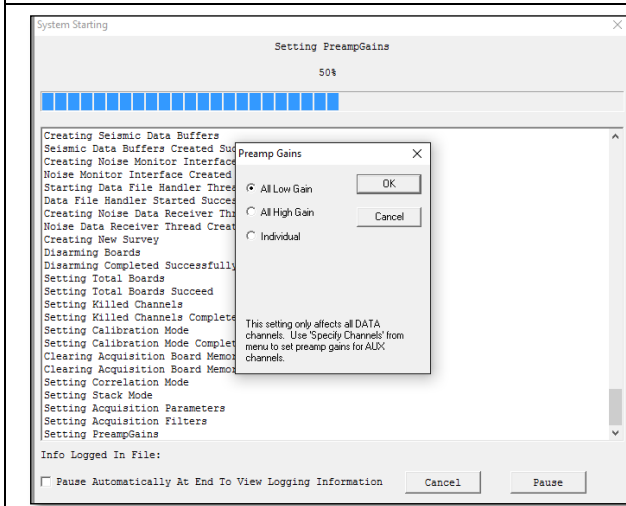
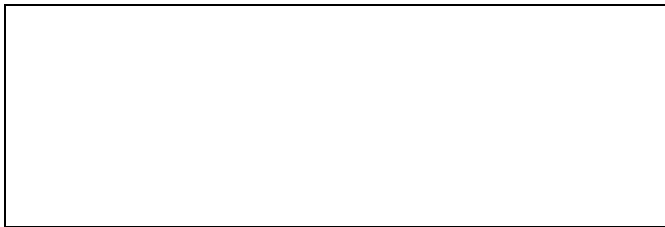


Ilustración B9. En esta etapa se establecen los parámetros Peamp Gains para cada uno de los ensayos.

Ensayo	Pream Gains
Refracción	All Low Gain
MASW 1D	All Low Gain
MAM	All High Gain

Tabla 2. Parámetros Pream Gains



usados para cada tipo de ensayo realizado.

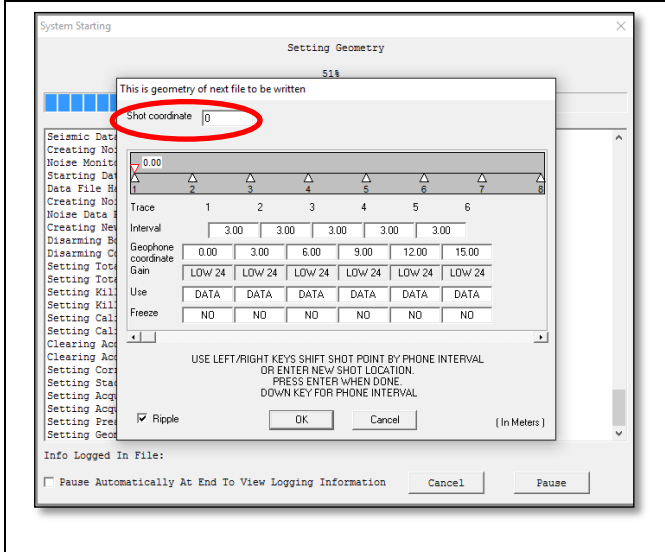


Ilustración B10. Aquí se puede observar la separación entre geófono, las coordenadas y la posición del punto de tiro, el cual más adelante en cada toma de datos se modifica la posición ingresando el valor de la coordenada en el cuadro “Shot coordinate”.

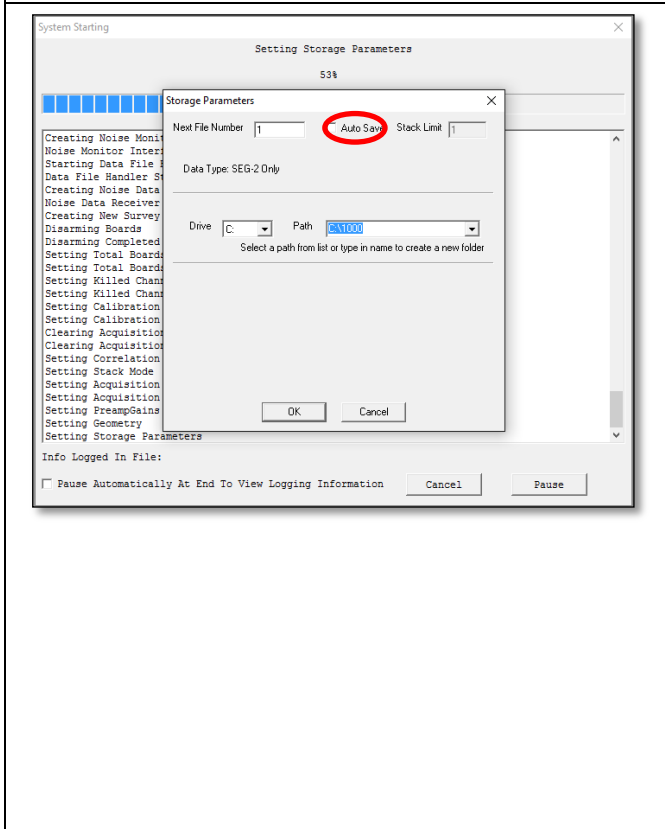
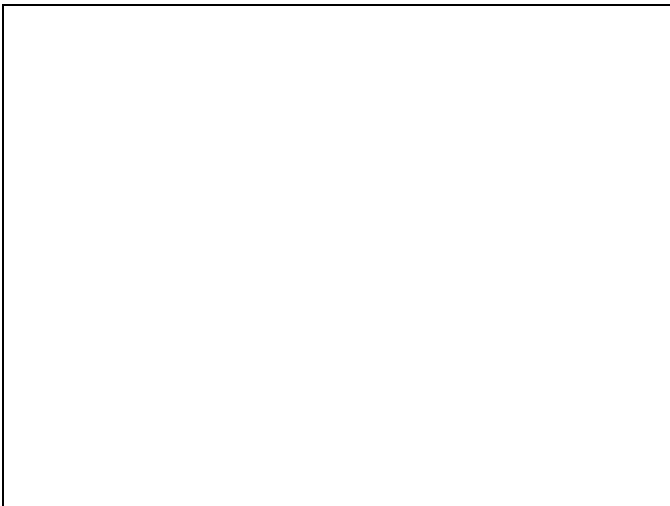


Ilustración B11. En este cuadro se define donde se van a guardar los datos y el consecutivo de las líneas, aquí se desactiva la opción **Auto Save** para refracción y MASW1D, pues la persona encargada de manejar el equipo en la toma de datos determinara si se obtuvo un buen registro, y para MAM se activa la opción **Auto Save**. Generalmente se recomienda guardar en el Drive D.

Ensayo	Trigger Mode
---------------	-------------------------



Refracción	Standar Trigger
MASW 1D	Standar Trigger
MAM	Auto-Trigger

Tabla 3. Parámetros usados para cada ensayo en el cuadro Storage Parameters.

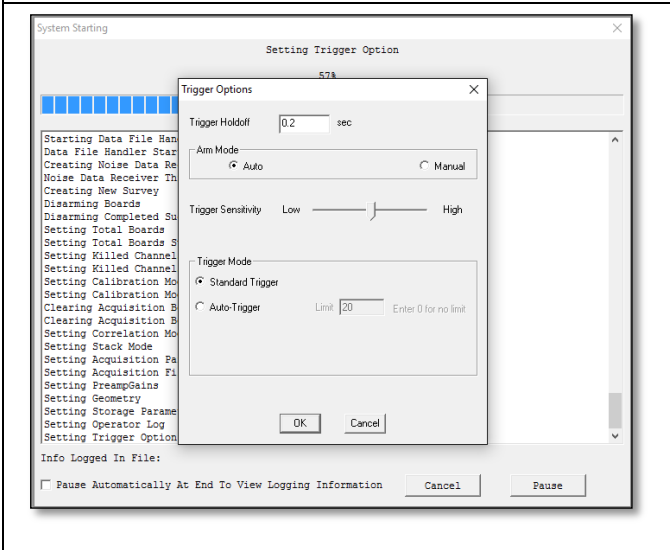


Ilustración B12. En este cuadro se determina la opción Trigger Mode. Para refracción sísmica y MASW 1D se trabaja con Standard Trigger.

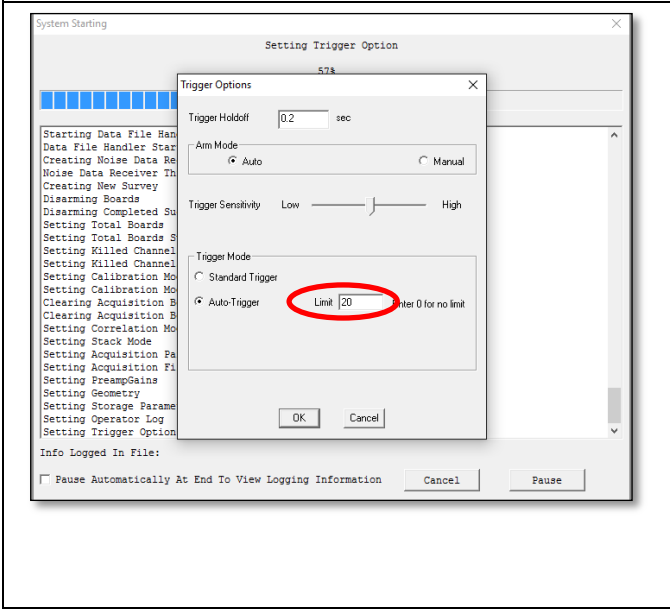


Ilustración B13. Aquí mostramos un ejemplo cuando se selecciona la opción de Auto Trigger, esta opción se usa para el ensayo MAM donde se deja el Geode registrando las vibraciones producidas por el ambiente en la zona de estudio y se selecciona la cantidad de veces que se quiere registrar en la casilla limit.

Después de haber establecido los parámetros para cada uno de los ensayos, nos disponemos a realizar el registro de los datos de las ondas.

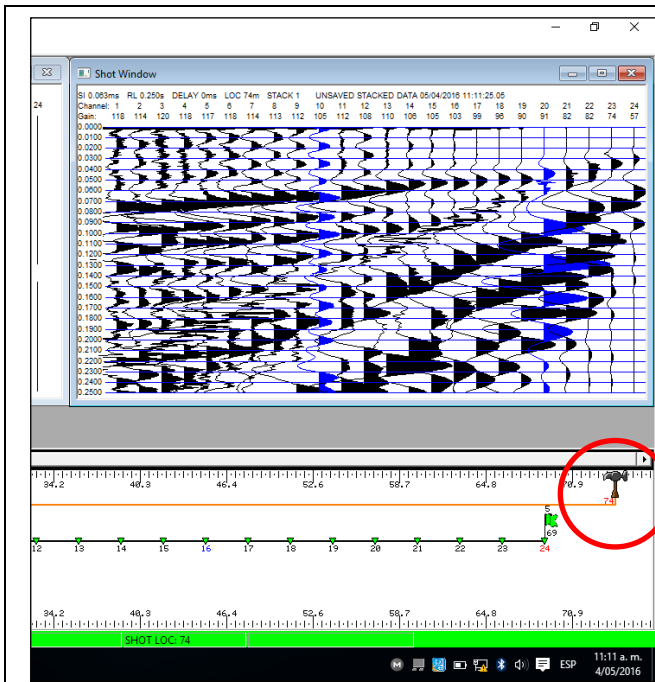


Ilustración B14. Ejemplo del registro de datos generados por un golpe en la platina localizado en la coordenada 79 metros, después de obtener los datos y ser aceptados por la persona encargada se guarda el archivo y se continúa con los demás registros.

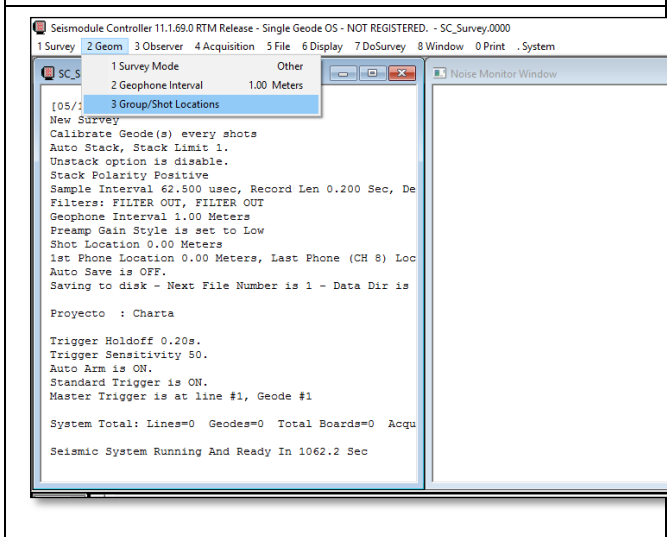


Ilustración B14. Para realizar lo demás registros se debe localizar la coordenada del punto de tiro, para eso ingresamos en la opción “Geom” de nuestra barra de herramientas, damos clic a la opción 3.

This is geometry of next file to be written

Shot Coordinate:

Trace	1	2	3	4	5	6
Interval	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Geophone coordinate	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Gain	LOW 24	LOW 24	LOW 24	LOW 24	LOW 24	LOW 24
Use	DATA	DATA	DATA	DATA	DATA	DATA
Freeze	NO	NO	NO	NO	NO	NO

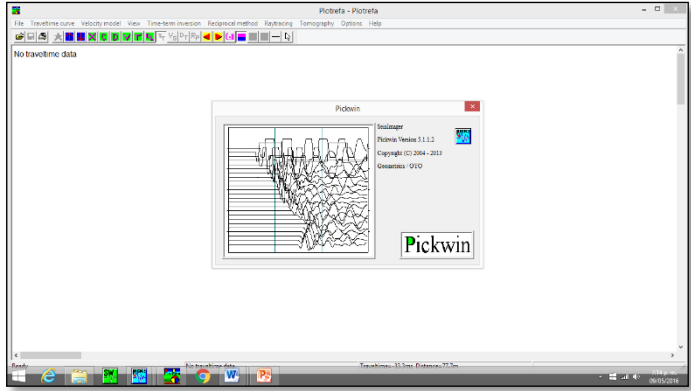
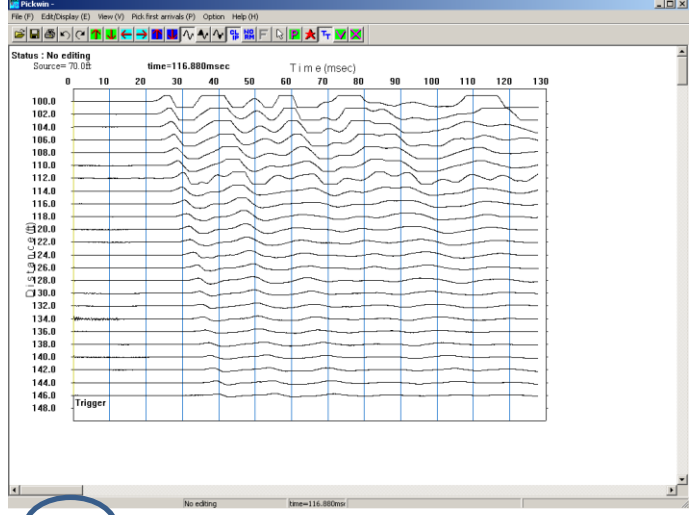

USE LEFT/RIGHT KEYS SHIFT SHOT POINT BY PHONE INTERVAL
OR ENTER NEW SHOT LOCATION.
PRESS ENTER WHEN DONE.
DOWN KEY FOR PHONE INTERVAL

Ripple (In Meters)

Ilustración B15. En el cuadro “Shot Coordinate” se establece la coordenada donde localiza el punto de tiro, este procedimiento se repite hasta tener todos los datos para su respectivo análisis.

ANEXO C PROCEDIMIENTO ANÁLISIS DE DATOS

En el presente anexo se indica el proceso realizado para el análisis de datos obtenidos en campo, con el Software SEISMAGER 2D, para el ensayo de refracción sísmica.

	<p>Ilustración C1. Se genera un archivo Pickwin, en el cual se va a realizar la primera etapa para el modelamiento de los datos.</p>
	<p>Ilustración C2. En la pestaña , se abren los sismogramas registrados en campo.</p>

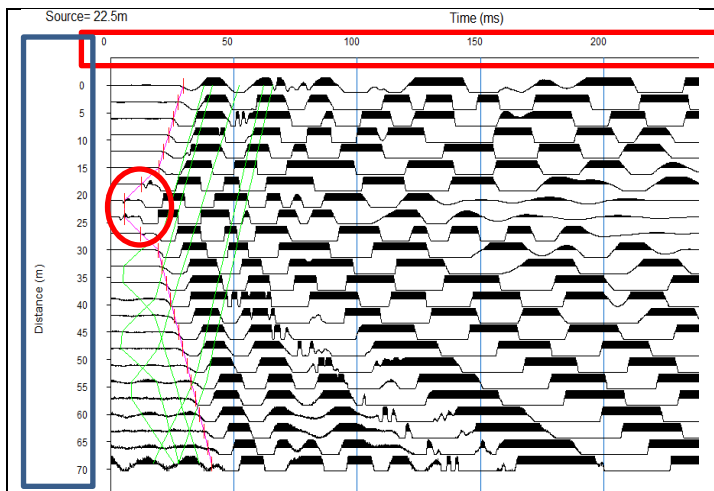


Ilustración C3. En esta imagen se puede identificar cada uno de los elementos que componen el sismograma, se identifica en el cuadro rojo la parte superior de la gráfica en la cual indica el tiempo, el cuadro azul en la parte izquierda de la imagen se observa la distancia en la cual se identifica la longitud del tendido sísmico (en nuestro caso 69 metros), las líneas negras horizontales representan la localización y ondas registradas por cada geófono (se observan 24 líneas que corresponden a los 24 geófonos usados), en el círculo rojo se identifica la zona de tiro y en el círculo azul la coordenada del tiro.

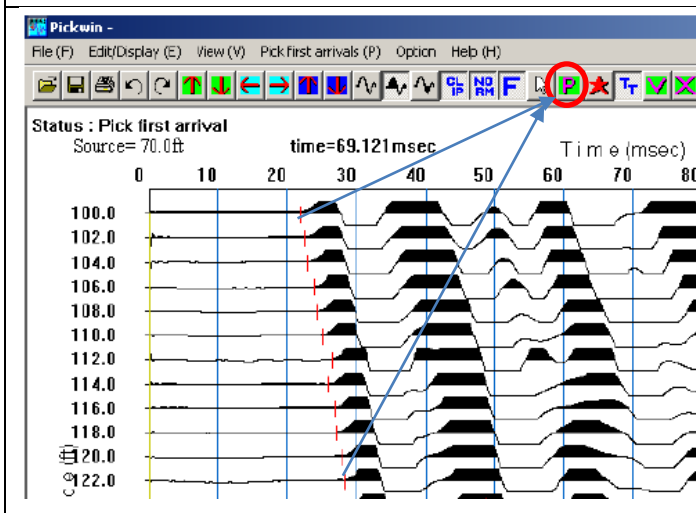
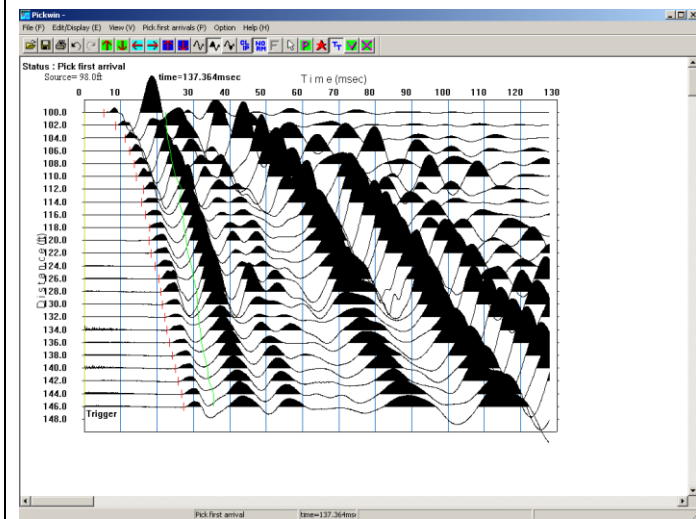
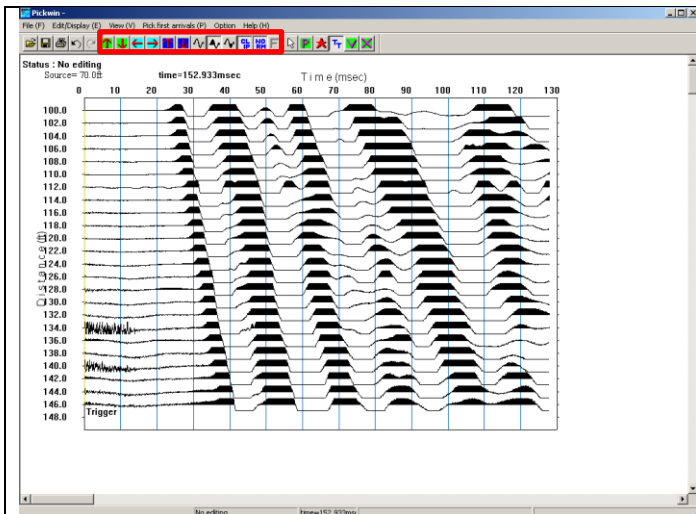
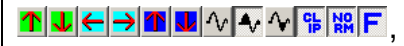


Ilustración C4. Con este conjunto de opciones



se puede optimizar la forma en que se observan los datos en pantalla, por ejemplo con las flechas se pueden ampliar las ondas para verlas con más detalle.

Ilustración C5. Para iniciar el proceso de análisis, se selecciona la opción **P** de la barra de herramientas, se marcan las rupturas o parte superior de cada onda a lo largo del tendido.

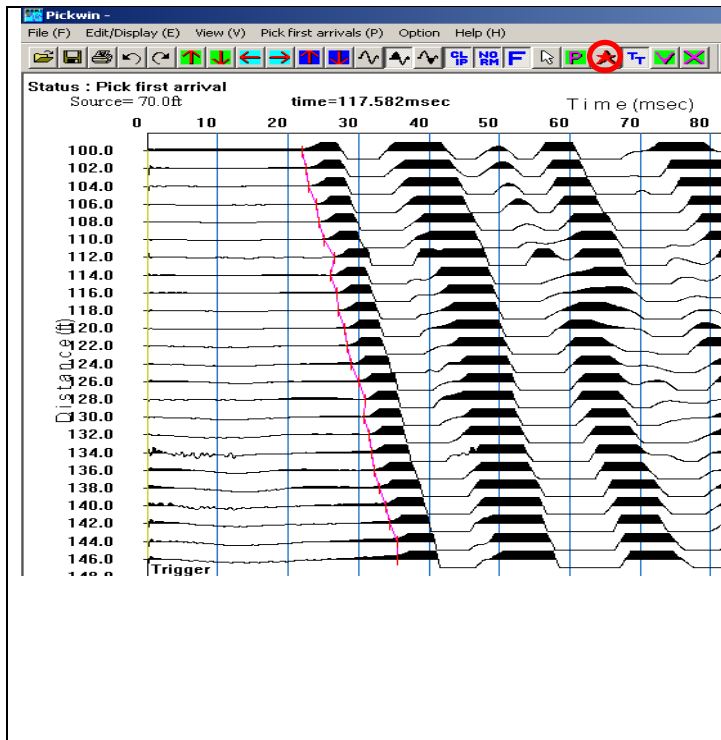



Ilustración C6. Con la opción , se conectan los puntos marcados en la ilustración anterior. Realizado este proceso se puede guardar (para guardar puede seguir la siguiente ruta: File-Save SGE2 file) este primer análisis al sismograma y de esta manera continuar el análisis con los demás sismogramas.

A continuación abrimos el siguiente sismograma y repetimos los pasos de las ilustraciones 2, 5 y 6 hasta completar este proceso para todos los sismogramas registrados en campo.

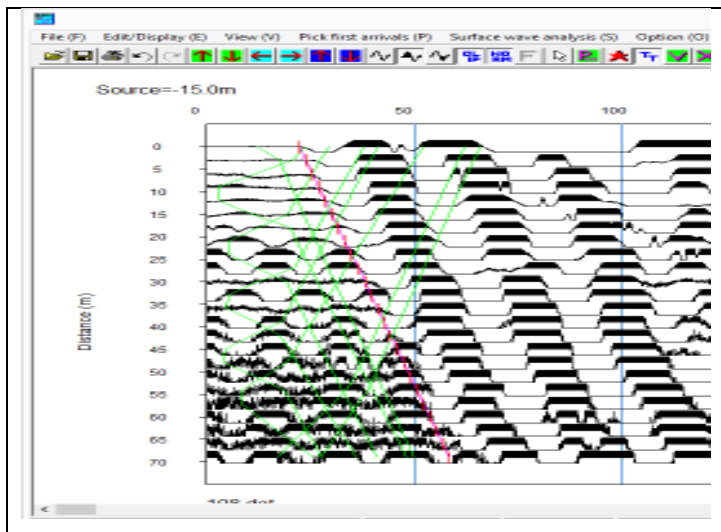


Ilustración C7. En esta ilustración vemos en el sismograma una serie de líneas verdes, estas líneas representan los sismogramas en los cuales ya se trabajó y hacen parte del presente análisis de refracción.

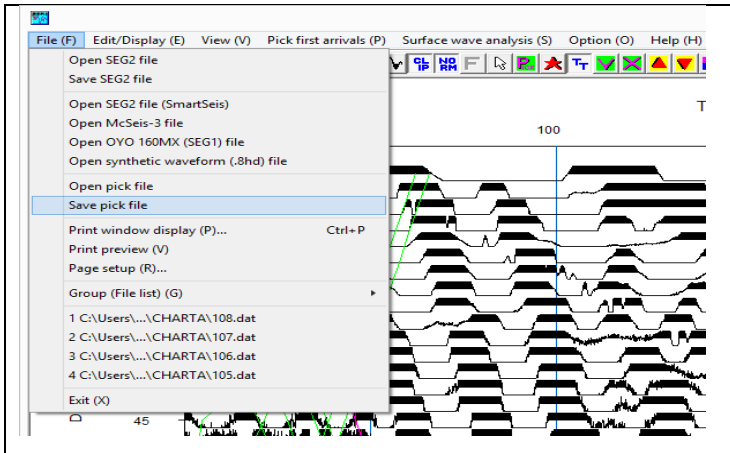


Ilustración C8. Completado el proceso para cada sismograma se genera un archivo Pickwin, para la siguiente etapa del modelamiento.

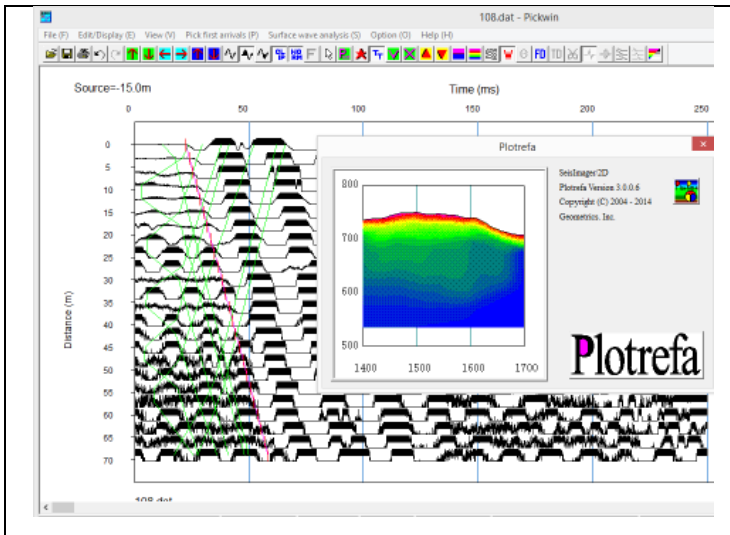



Ilustración C9. En esta parte del proceso de análisis se abre el software Plotrefa en el cual se hace el análisis Seimager 2D. En esta etapa en la opción , se abre el archivo Pickwin generado en nuestra primera etapa del análisis de los sismogramas.

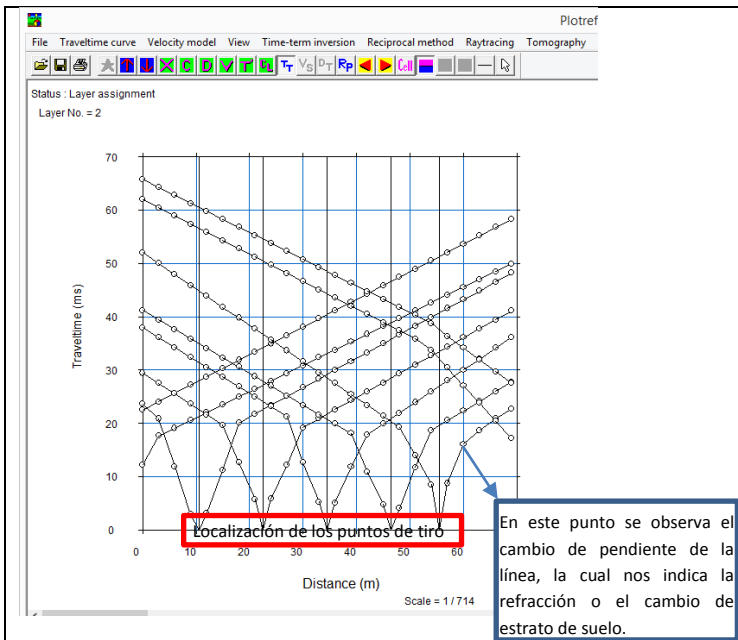


Ilustración C10. Primera visualización del archivo Pickwin, donde se observan puntos, estos representan lo que se hizo en la ilustración 5, donde marcamos la parte superior de cada onda en el sismograma. En la parte inferior se observan unos picos, estos representan los puntos de tiro que se realizaron a lo largo del tendido sísmico. En esta imagen se puede detallar la refracción de las ondas en el cambio de ángulo de cada línea.

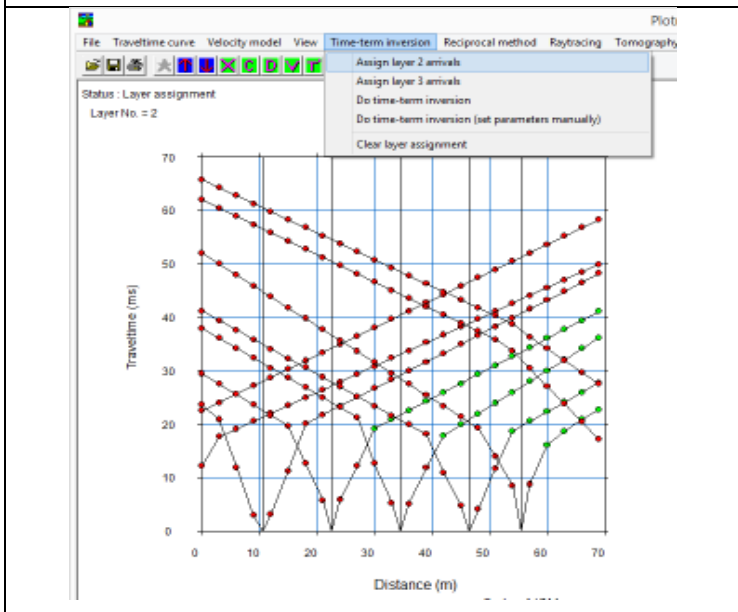


Ilustración C11. Con la ruta mostrada en la imagen se inicia asignación de las capas, identificando cada capa con un color representativo, en esta imagen se observa inicialmente como se van seleccionando los puntos de la capa inferior (los puntos de color verde son los

seleccionados para identificar el estrato inferior en la imagen).

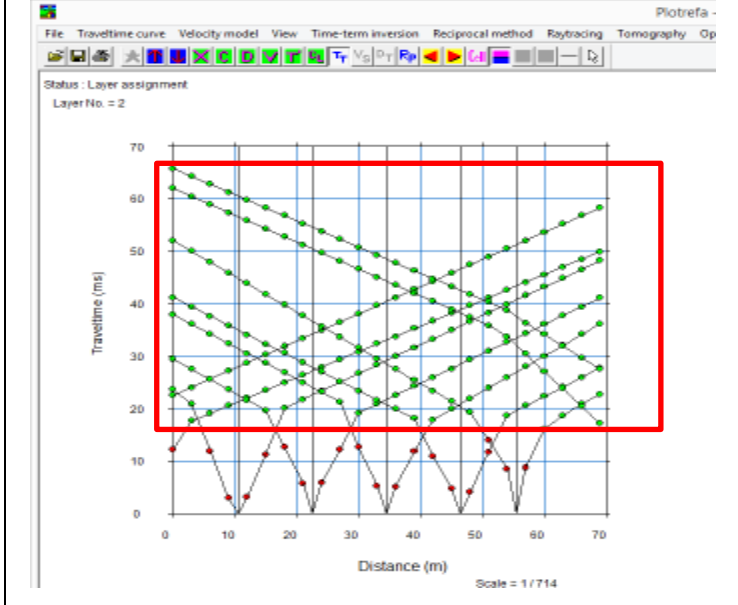


Ilustración C12. En el cuadro podemos identificar la capa seleccionada punto por punto.

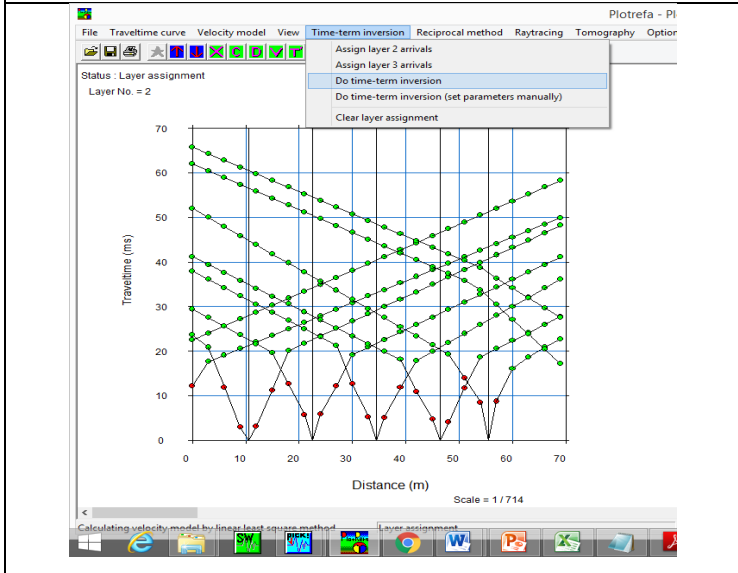


Ilustración C13. Con la ruta mostrada en la imagen, se hace la inversión del tiempo de duración, con la cual el software genera el perfil estratigráfico con las respectivas velocidades de ondas P de cada estrato.

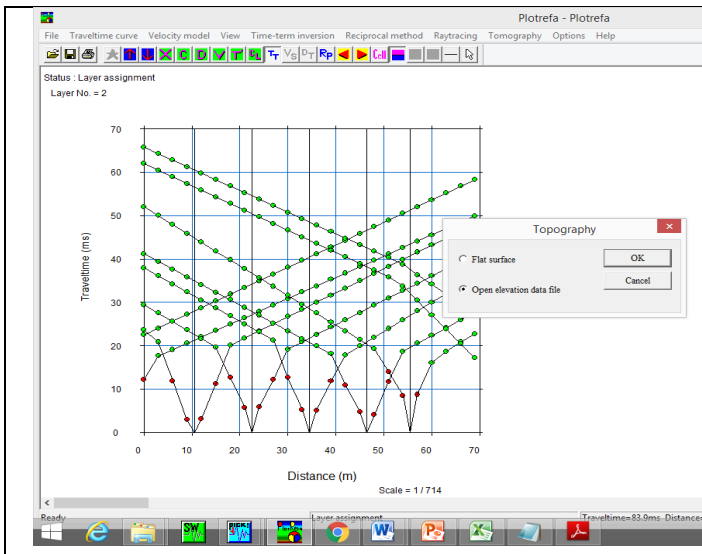


Ilustración C14. Al seleccionar la inversión de tiempo, el software nos permite establecer la topografía del tendido sísmico.

	A	B	C
1	0	2038.01	0
2	3	2038.01	0.33
3	6	2037.68	0.2
4	9	2037.48	0.04
5	12	2037.44	0.33
6	15	2037.11	0.21
7	18	2036.9	0.14
8	21	2036.76	0
9	24	2036.76	-0.13
10	27	2036.89	0.08
11	30	2036.81	0.34
12	33	2036.67	-0.08
13	36	2036.55	0.06
14	39	2036.49	0.09
15	42	2036.4	0.14
16	45	2036.26	0.15
17	48	2036.11	0.16
18	51	2035.95	0.1
19	54	2035.85	0.28
20	57	2035.57	-0.12
21	60	2035.69	-0.12
22	63	2035.81	-0.09
23	66	2035.9	-0.1
24	69	2036	

Archivo	Edición	Formato	Ver
0	2038.01		
3	2038.01		
6	2037.68		
9	2037.48		
12	2037.44		
15	2037.11		
18	2036.9		
21	2036.76		
24	2036.76		
27	2036.89		
30	2036.81		
33	2036.47		
36	2036.55		
39	2036.49		
42	2036.4		
45	2036.26		
48	2036.11		
51	2035.95		
54	2035.85		
57	2035.57		
60	2035.69		
63	2035.81		
66	2035.9		
69	2036		

Ilustración C15. En la imagen se identifican 3 casillas en el programa Excel, la casilla A representa la coordenada respecto a la horizontal de cada geófono del tendido sísmico, en la casilla B se registra la altura sobre el nivel del mar de cada geófono y en la casilla C la diferencia de altura entre cada geófono y el nivel de referencia, en este caso el geófono 1 localizado en la coordenada 0 respecto a la horizontal. El archivo debe guardarse en el bloc de notas.

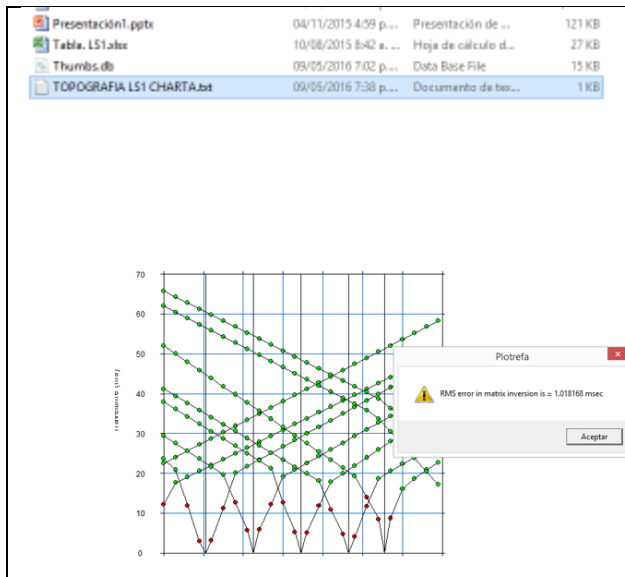


Ilustración C16. En esta etapa se selecciona el archivo el cual es un documento de texto guardado en el bloc de notas, a continuación saldrá un cuadro de dialogo, le damos aceptar.

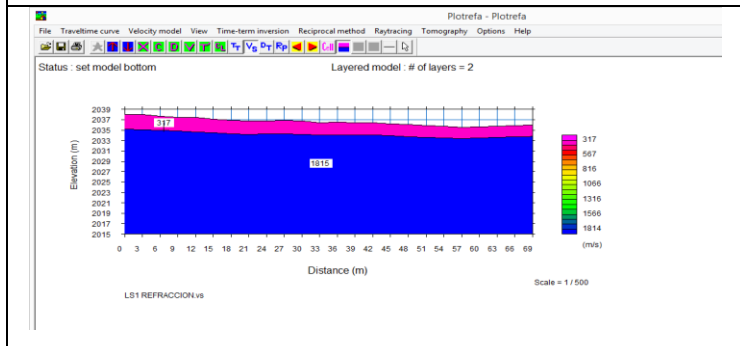


Ilustración C17. Modelo 1, resultado del análisis realizado a los sismogramas registrados en campo.

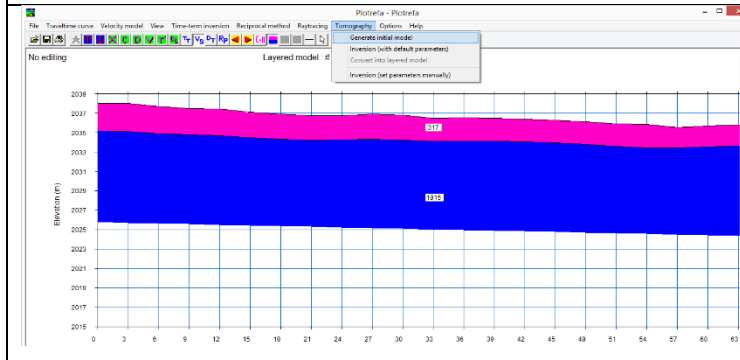


Ilustración C18. Se continua con el análisis, en este caso para pasar del perfil estratigráfico a un modelo tomografico 2D.

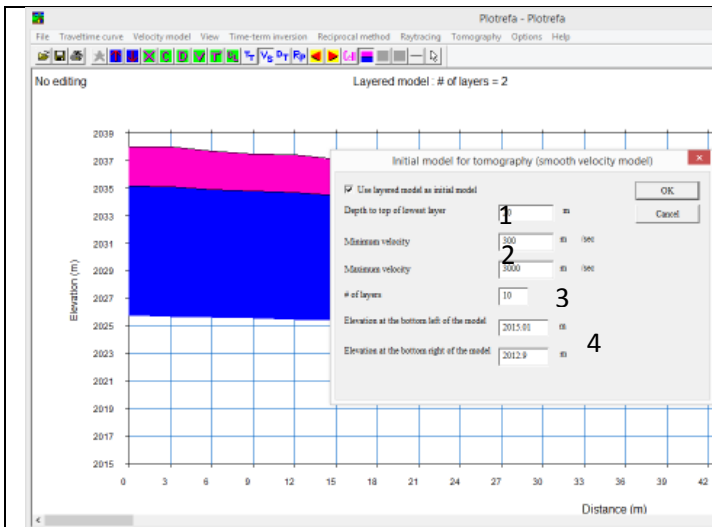


Ilustración C19. En esta etapa se determinan los parámetros para la tomografía.

1. Profundidad de capas, es decir hasta que profundidad quiere hacer la tomografía.
2. Velocidad mínima y máxima.
3. Numero de capas
4. Elevación de la parte inferior izquierda y derecha del modelo.

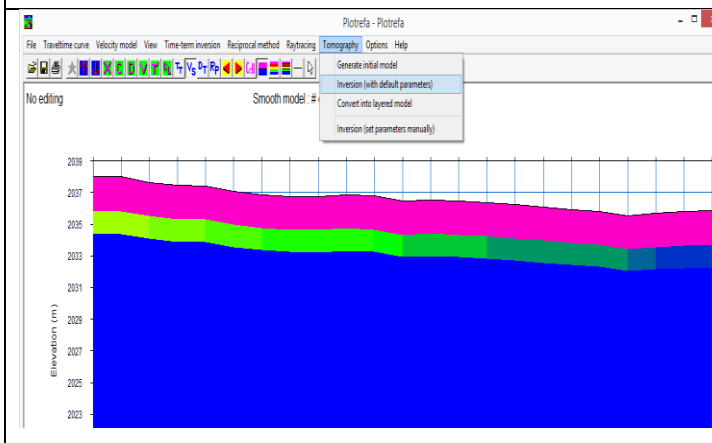


Ilustración C20.

Seleccionamos la opción de Inversión por defecto y obtenemos nuestro modelo de tomografía.

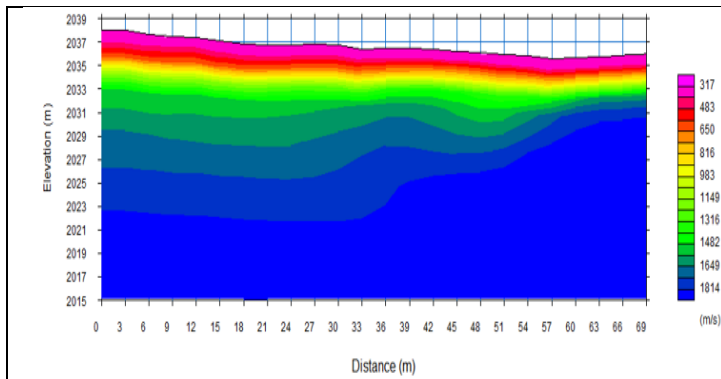


Ilustración C21. En la parte izquierda del modelo se observan la elevación en metros sobre el nivel del mar del perfil, en la parte derecha del modelo se identifican los colores representativos para cada capa de velocidad de onda y en la parte inferior se representa las coordenadas de cada geófono respecto a la horizontal con origen en el geófono 1.