

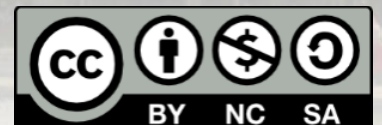


**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**GUIA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA
EJECUCIÓN DEL ENSAYO GEOFÍSICO DE
REFRACCIÓN (MASW)**

Laura Daniela Ramírez Cárdenas

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental
Medellín, Colombia
2021



GUIA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO GEOFÍSICO
DE REFRACCIÓN (MASW)

Laura Daniela Ramírez Cárdenas

Informe de Práctica académica como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera civil

Asesores (a):

Carlos Alberto Gómez Ramírez, Ing. civil, Esp, Magister

Álvaro José Mattos Olivella, Ing. civil M. Eng

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2021.

Contenido	
<u>1. Resumen</u>	3
<u>2. Introducción</u>	4
<u>3. Objetivos</u>	5
<u>3.1. Objetivo general</u>	5
<u>3.2. Objetivos específicos</u>	5
<u>4. Metodología</u>	5
<u>4.1. Definiciones y conceptos</u>	5
<u>4.2. Equipos, instrumentos, dispositivos</u>	10
<u>4.3. Ensayo ASTM D5777</u>	14
<u>4.3. Trabajo de campo (Adquisición de datos)</u>	18
<u>4.3.1. Zonas Urbanas</u>	18
<u>4.3.2. Zonas Suburbanas</u>	20
<u>5. Resultados y análisis</u>	25
<u>6. Recomendaciones</u>	32
<u>7. Conclusiones</u>	32
<u>8. Referencias</u>	33

1. Resumen

En los proyectos de infraestructura, es importante estudiar el comportamiento mecánico de los suelos para determinar su rigidez y resistencia. Para ello se requiere la ejecución de métodos de exploración geofísica para caracterizar la estratigrafía del suelo. Entre los ensayos geofísicos, se encuentra el método de análisis multicanal de ondas de superficie (MASW). Este ensayo determina la estratigrafía del suelo de forma indirecta basándose en el cambio de las propiedades dinámicas que conforman el suelo. En la ejecución del ensayo MASW, se presentan factores y condiciones que alteran la adquisición de datos y conllevan a errores de resultados. Por tanto, para mitigar los errores, se requieren conocer las condiciones de campo que tienen un efecto significativo en la toma de medidas. En este estudio se caracterizan los conceptos, condiciones y limitaciones del ensayo MASW, se identifican las variables más influyentes en la adquisición de datos y se establecen recomendaciones para ejecución del ensayo con base a seis proyectos de estudios de suelos en zonas urbanas y suburbanas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

2. Introducción

La geofísica es la ciencia que se enfoca en estudiar la física de la tierra, a través de esta se pueden aplicar métodos de prospección superficial que ayuden a determinar propiedades de los diferentes estratos presentes en el suelo (Alvarado, G.1959. p 26). A través de los resultados de dichos ensayos se puede determinar cómo se encuentra estructurada dicha superficie, analizar sus particularidades en material y realizar un breve reconocimiento de sus componentes y condiciones del terreno, entre otros. Ahora bien, el proceso de análisis de resultados se realiza con el fin de generar un mejor uso de los equipos geofísicos, sintetizando y disminuyendo los errores que se presentan al momento de la toma de estos (Villamizar, 2011).

En el ensayo geofísico, es fundamental seguir ciertos pasos los cuales son: el poder obtener información de cómo está la estructura, también si hay algún problema de deformidad en los materiales, determinar la profundidad del estrato rocoso, la evaluación del grado de efectividad de los tratamientos que se hacen en la mejora del terreno, entre otros, no obstante, el hacer este tipo de ensayo se requiere cierta rigurosidad, es decir, cualquier vibración o alteración al momento de la prueba hace que sus valores cambien notablemente (Geoseismic, 2017a).

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica aplicada, se encuentra la refracción sísmica, la cual consiste en medir los tiempos de propagación de las ondas elásticas transcurridos entre el lugar en el que se generan las ondas y la llegada de estas a diferentes puntos de observación (Geoseismic, 2017b).

En el campo de la ingeniería civil se aplica este método para determinar profundidades a basamento o donde se pretende cimentar proyectos de construcción, represas y grandes hidroeléctricas, también para obtener perfiles de meteorización o competencia de la roca.

Línea Sísmica SAS es una empresa consultora del régimen común la cual fue creada en el año 2018, ésta se desenvuelve en el área de la ingeniería estructural y geotécnica mediante la realización de estudios de suelos para proyectos de infraestructura y vivienda. Dentro de los servicios ofrecidos por la empresa se encuentran los ensayos geofísicos, los cuales, ayudan a complementar la información para determinar un perfil geotécnico del suelo con mayor exactitud.

Adicionalmente, el ensayo geofísico de refracción integra información importante a la hora de determinar un horizonte de suelo, pero también tiene gran importancia para la aplicación práctica, ya que, se obtiene información veraz y confiable de gran rigor para el estudio en cuestión. Según lo anterior, se hace necesario para Línea Sísmica la elaboración de una guía donde de manera integrada se describan los pasos para tener en cuenta y los malos procesos al momento de realizar el ensayo geofísico, con esto, la empresa minimizará los errores en los resultados.

Teniendo en cuenta lo anterior, y con el objetivo de hacer un buen estudio del suelo, la geofísica se encarga de complementar los ensayos de campo por medio de la prospección del suelo y permite determinar de manera clara todos los horizontes de este, de la importancia de este, nace la necesidad de desarrollar una guía de buenas prácticas para sintetizar en su mayoría los errores presentados a la hora de las mediciones geofísicas del ensayo de

refracción (MASW), para esto se muestran una serie de conceptos y definiciones que complementadas con la norma del ensayo nos brindaran una base sólida para la adquisición de los datos en campo y con la ayuda del procesamiento de los datos reconocer los errores que se presentan al tener unas malas prácticas y brindar pautas a tener en cuenta al momento de la adquisición de los datos.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Caracterizar una metodología para desarrollar una guía de buenas prácticas para la ejecución del ensayo geofísico de refracción MASW con el fin de mitigar errores en la etapa de adquisición de datos.

3.2. Objetivos específicos

- Determinar los errores producidos por condiciones operacionales del ensayo MASW en la adquisición de datos a través del método del problema inverso para la línea activa.
- Presentar recomendaciones de ejecución del ensayo MASW en zonas urbanas y suburbanas considerando variaciones en las condiciones ambientales y en la distribución espacial de geófonos y fuente de percusión.
- Establecer relaciones y diferencias entre curvas de dispersión, en función de la velocidad de fase y la frecuencia, para estudios de suelos de seis proyectos de infraestructura discretizados por el nivel de ruido al ensayo MASW.

4. Metodología

4.1. Definiciones y conceptos

La Geofísica es aquella ciencia que se encarga de estudiar cómo están las propiedades de la tierra o de un determinado entorno, con el fin de establecer cómo está la estructura de dicho sitio visto a partir de ciertas propiedades físicas conformadas por ciertos materiales (CEDEX, 2019.)

Esta técnica, ayuda a identificar ciertos problemas que se encuentran en los primeros metros de profundidad de la tierra, es por esto, por lo que es primordial que se sigan ciertos parámetros como lo es el reconocimiento del terreno, el cual consiste en conseguir información necesaria de cómo se encuentra la estructura del suelo, delimitar la deformidad de los materiales, establecer la profundidad donde todos los poros del suelo están saturados y el sustrato rocoso, además, por medio de este se determina las cavidades y fracturas, se hace una previa evaluación del grado de efectividad de la mejora de la tierra con ciertos tratamientos y por último se hace un estatuto de los daños en las estructuras (CEDEX, 2019). Ahora bien, los ensayos geofísicos basan su aplicación en propiedades físicas que están en los materiales geológicos, como la densidad y la conductividad (Villamizar, 2011).

En la Ingeniería civil, es fundamental hacer un reconocimiento del suelo para desarrollar cierto proyecto con éxito y seguridad, para esto se utilizan ciertos métodos que ayudan a identificar la zona que se va a trabajar, con este se pretende saber qué tipo de cimientos usar, los modos de excavación, en sí como se debe manejar esa zona de la tierra, a través de los sondeos mecánicos y ensayos geofísicos (Villamizar, 2011).

Existen ensayos geofísicos no invasivos que permiten realizar un sondaje del terreno sin tener que perturbarlo, entre los cuales se encuentra la refracción sísmica, el cual se usa para la medición de espesores de recubrimiento, profundidad de niveles freáticos y realización de estudios hidrológicos (Suárez, 2017).

El ensayo consiste en medir los tiempos de viaje de ondas P (tipo de onda que hacen vibrar una partícula en el sentido de la propagación de las ondas) desde una fuente de impulso a una serie de puntos a lo largo de la superficie del suelo a diferentes distancias, en la Figura 1 se muestra una representación de cómo se toma el ensayo de refracción, partiendo desde la adquisición en campo en donde se observa una fuente de energía que excita el suelo y por medio de un equipo de registro se almacena el momento del impulso, de allí se pueden determinar las primeras de las ondas a cada receptor que nos permitirá dibujar la gráfica tiempo-distancia, a partir de este gráfico se obtiene una curva de dispersión experimental de los datos tomados en campo, posteriormente se utilizan los datos para la solución del problema de identificación de los datos, este paso implica la elección de un modelo de referencia para la interpretación que comprende una pila de capas elásticas homogéneas y lineales, cada uno de estos pasos está interrelacionado y su interacción debe tenerse en cuenta para el proceso de interpretación (Foti et al., 2014).

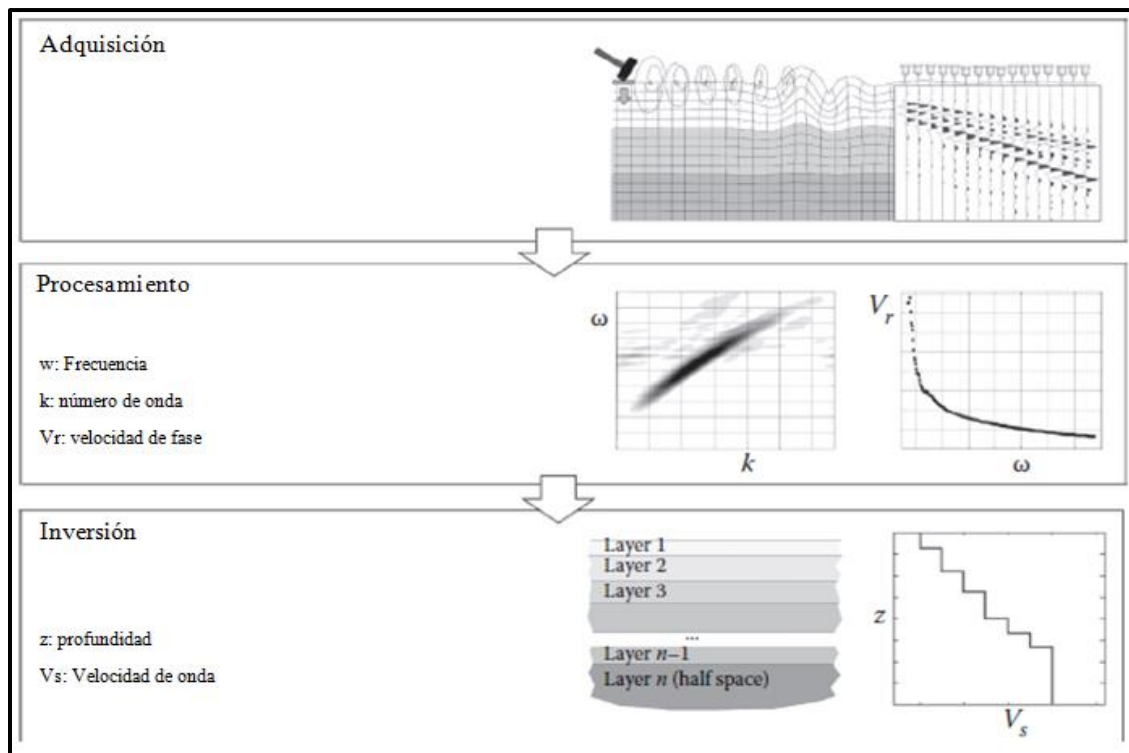


Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento del ensayo de refracción. Fuente: (Foti et al., 2014)

El objetivo del proceso de inversión es crear un modelo de suelo estratificado horizontalmente de propiedades elásticas compatibles con las observaciones de terreno y reflejadas a través de las curvas de dispersión. Los gráficos de inversión dependen principalmente de la velocidad de onda de corte y son prácticamente insensibles a variaciones de la densidad y velocidades de onda de compresión con la profundidad. Como se muestra en la Figura 2 la idea general de la inversión es calcular las curvas de dispersión asociadas a modelos de estratos horizontales de suelo (problema directo) y utilizando algún algoritmo de búsqueda, encontrar el modelo que tenga mayor ajuste con las observaciones del terreno (problema inverso) (Humire et al., 2015).

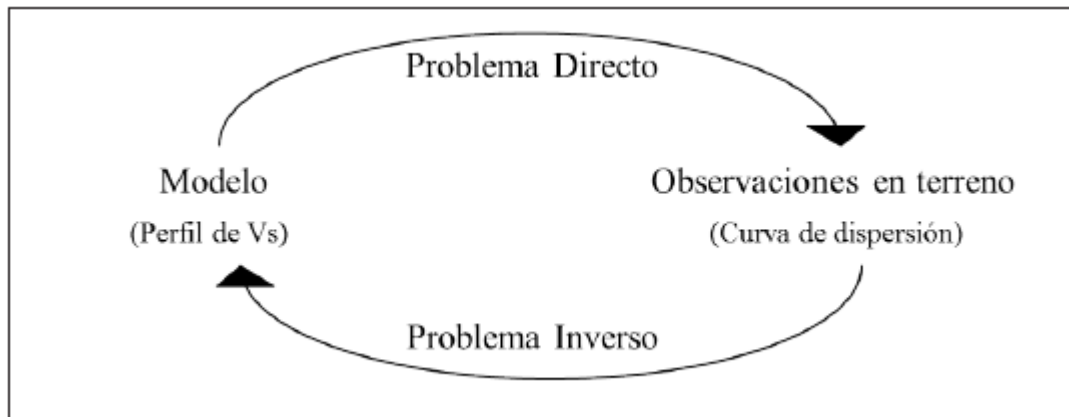


Figura 2. Diagrama del problema inverso. Fuente: (Humire et al., 2015)

- Método MASW (multichannel analysis of Surface waves)

El método geofísico MASW (multichannel analysis of Surface waves) es un método no invasivo que nos permite identificar la estratigrafía del subsuelo basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que lo conforman. Este método está basado en la interpretación de ondas superficiales (Rayleigh) de un registro de sensores espaciados a distancias iguales desde una fuente de energía donde se excitará el terreno por medio de vibración o impacto y el cual nos proporcionará una nube de datos que nos permitirá realizar un perfil de velocidades de onda de corte (V_s). Los datos tipo multicanal facilitan la identificación de señales con modos no fundamentales de ondas Rayleigh permitiendo eliminar el ruido ambiental o de la locación (GEOSYSTEM, 2010).

El ensayo MASW puede ser dividido en ensayos pasivos y ensayos activos, estos dependen de la fuente que se utilice para la adquisición.

Métodos Activos: las ondas superficiales que se registran son generadas por una fuente impulsiva, como el golpe de un martillo o explosivos. La señal es captada por un arreglo lineal de sensores, que luego, a partir de esta, se determina la velocidad de fase por medio de un análisis espectral (Rivas, 2016).

Métodos pasivos: este método geofísico registra el ruido ambiental, por lo tanto, no requiere de una fuente impulsiva. Emplea un arreglo de sensores que puede ser unidimensional o bidimensional. Los datos que registra son analizados para obtener velocidades de ondas de corte (Rivas, 2016).

El método MASW se divide en tres pasos (ver Figura 1) el cual se inicia con la adquisición de datos, que es el proceso durante el cual la onda relacionada con la propagación de una perturbación generada por una fuente dinámica es registrada por el tendido sísmico en la superficie del terreno, partiendo de la adquisición, que en este caso de estudio se realizará teniendo en cuenta la norma ASTM D5777-00 que mostraremos más adelante, se procede a extracción de una curva confiable de dispersión y posteriormente a la inversión que permite establecer la velocidad de ondas de corte.

- Construcción de la curva de dispersión:

La construcción de una curva de dispersión confiable vendrá a ser el paso más importante del análisis del ensayo MASW. Este método asume que los registros tomados están compuestos en su mayoría por el modo fundamental de vibración de las ondas superficiales e ignora los modos superiores. Cómo es posible que los registros contengan modos superiores y energía no despreciable es importante que se puedan detectar para no incurrir en resultados poco confiables.

El proceso para construir la curva de dispersión considera primeramente el sismograma cuyo gráfico corresponde al dominio de desplazamiento-distancia (x, t) o curvas domocrónicas que serán nuestro punto de partida para la determinación de la velocidad de las ondas. El sismograma se representa por la siguiente función f(x, t), a la cual se aplica la siguiente transformada de Fourier, mostrada en la ecuación 1:

$$F(x, w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) e^{-i\omega t} dt \quad \text{Ecuación (1)}$$

Transformado la función f(x, t) cuyo dominio es el desplazamiento - tiempo a una función F(x, w) con dominio del desplazamiento – frecuencia.

F(x, w) puede ser expresada según la ecuación 2:

$$F(x, w) = P(x, w)A(x, w) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde A(x, w) corresponde a espectro de amplitudes y P(x, w) corresponde al espectro de fase.

El espectro de fase P(x, w) conserva todas las propiedades dispersivas de las ondas generadas y el espectro de amplitud conserva las propiedades de atenuación de las ondas. De esta manera se puede expresar F(x, w) también como muestra la ecuación 3:

$$F(x, w) = e^{-i\varphi x} A(x, w) \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde $\varphi = w/c_w$, w= frecuencia en radianes y c_w = velocidad de fase en función de la frecuencia.

Luego la gráfica de dispersión se genera apilando en función de los cambios de fase a través de la siguiente transformada (ecuación 4):

$$F(c, w) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x, w) t e^{-i\omega \frac{x}{c}} dx \quad \text{Ecuación (4)}$$

Luego la función F(c, w) tendrá máximos a lo largo del dominio de c_w , lo cual permitirá graficar la curva de dispersión.

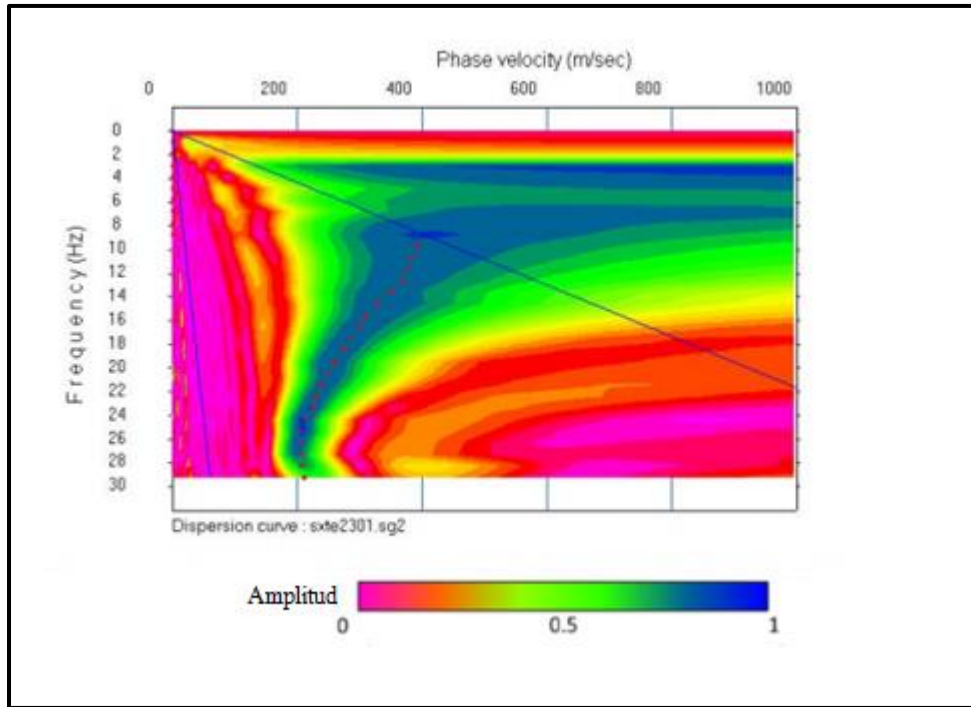


Figura 3. Curva de dispersión. Fuente: (Wave & Acquisition, 2005)

Una vez obtenidos los pares de $F(c, w)$ con las velocidades de fase c_w , se procede a combinar todos los pares construyendo el grafico de dispersión. La curva de dispersión es el resultado de máximas amplitudes asociadas a la velocidad de fase y la frecuencia (Suárez, 2017)

- Inversión de los datos:

A partir de la correcta determinación de la curva de dispersión se procede a realizar los perfiles de velocidad de onda corte V_s , los cuales se calculan usando un método de inversión iterativo que requiere de los datos de dispersión y estimaciones de módulos de Poisson y distribución de densidades. Luego de esta determinación se recurre a metodologías de inversión de los registros que se obtuvieron por medio de un proceso de optimización denominado algoritmos genéticos de los cuales se obtiene un resultado más fiable y presenta una estimación de resultados ajustados. Al tener ruido en el ensayo la curva de dispersión arrojará datos de baja calidad, lo que provoca que el modelo de inversión al ser iterativo se demore en converger a un perfil definitivo, es por esto por lo que se hace necesario la eliminación de datos de baja calidad en la curva de dispersión. Para iniciar el proceso iterativo se debe especificar un modelo inicial como punto de partida, el cual consta de la velocidad de onda de corte, la densidad, y el parámetro de espesores de capa del suelo, los cuales tendrán más incidencia en la confiable convergencia del algoritmo (Suárez, 2017). Cabe destacar que el proceso de extracción de la curva de dispersión e inversión dependen exclusivamente de la experiencia y criterio del ingeniero que se encarga de procesar la geofísica.

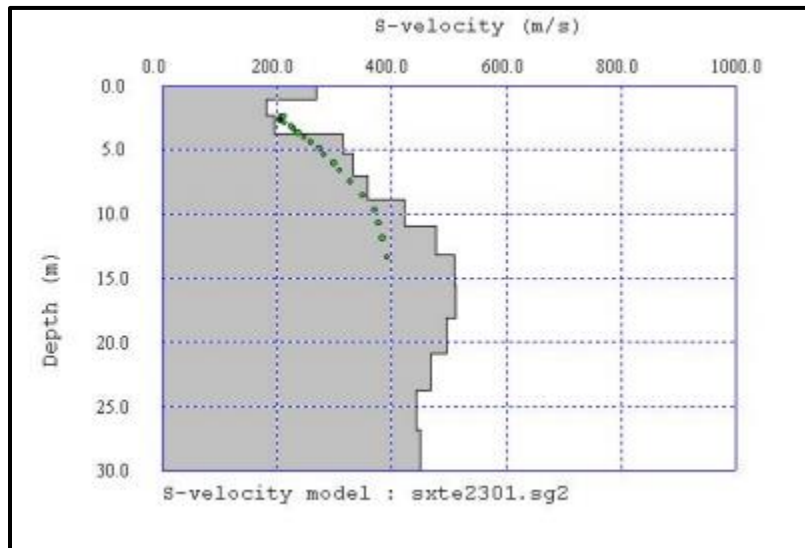


Figura 4. Perfil de velocidad de onda de corte Vs. Fuente: (Wave & Acquisition, 2005)

4.2. Equipos, instrumentos, dispositivos

El equipo utilizado para la adquisición de los datos debe permitir registrar el frente de ondas en el rango de frecuencias deseado sin distorsiones (Foti et al., 2014).

Se requiere de tres elementos principales al momento de la adquisición de datos, una fuente, un conjunto de receptores y un sistema de adquisición. El posicionamiento adecuado de la fuente y los receptores es un paso importante para la obtención fiable de datos, esta se puede hacer con la ayuda de una cinta métrica en campo. Los receptores detectan una señal imprimida por la fuente que se traduce en señales eléctricas que serán leídas por el sistema de adquisición que digitaliza y registra los datos, la correcta funcionalidad de estos tres elementos influyen en la calidad de los datos adquiridos, luego estos se conectan a unos elementos secundarios que agrupados permiten la correcta cadena de medición del ensayo. En la Figura 5 se representa un esquema del equipo de adquisición y posteriormente se explican las características de cada uno de los elementos que lo conforman.

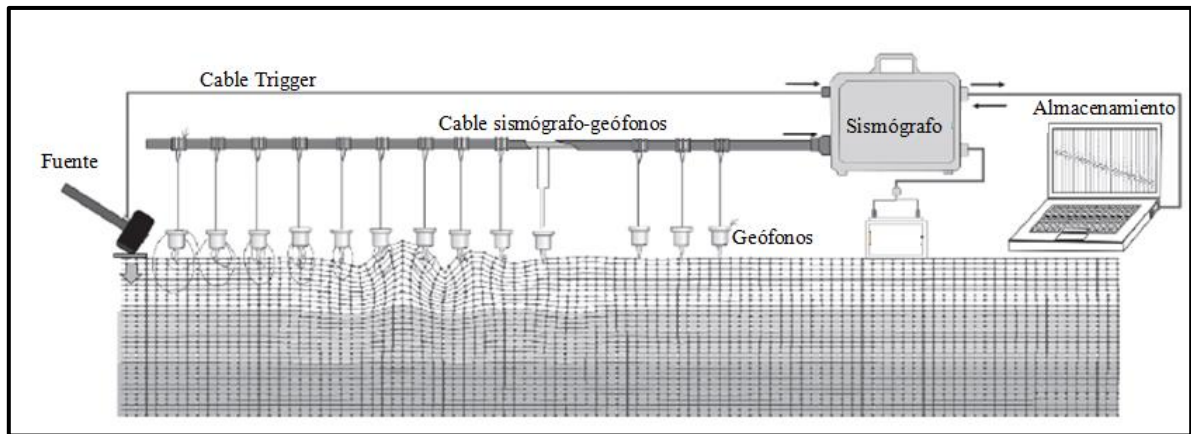


Figura 5. Esquema adaptado del equipo de campo con los elementos esenciales para la adquisición de datos. Fuente: (Foti et al., 2014)

Sismógrafo: cumple la función de recibir los impulsos eléctricos percibidos por los geófonos, amplificarlos y pasarlos de señales análogas a señales digitales (López et al., 2008). Para la toma de los ensayos se utilizará un sismógrafo multicanal el cual permite la conexión de hasta 48 geófonos, de los cuales solo se conectarán 19 que son los dispuestos por la empresa, en este tipo de sismógrafos se registran las señales percibidas por todos los geófonos simultáneamente, permitiendo al operador observar la tendencia de los datos y así lograr un mayor grado de fiabilidad en los registros del ensayo.



Figura 6. Sismógrafo PASI de 24 canales. Elaboración propia.

Geófonos: se les llama geófonos o sensores al conjunto de receptores que perciben los movimientos o vibraciones del suelo, estos tienen como función transformar estas percepciones a señales eléctricas de características de frecuencia y amplitud análoga a la de las ondas que detecta y registra el sismógrafo (López et al., 2008). Cada geófono tiene un cable de 1 metro de longitud aproximadamente, con terminales que se enlazan a otro cable que conecta a los geófonos con el sismógrafo. Para este caso de estudio se emplearon geófonos verticales cuya frecuencia es de 4.5 Hz.



Figura 7. Geófono de 4.5Hz. Elaboración propia.

Cable de conexión de geófonos-sismógrafo: los geófonos anteriormente descritos se conectan a un cable que a su vez se conecta al sismógrafo. Este cable es quien transporta las señales eléctricas transformadas por los geófonos. Se disponen de dos cables por parte de la empresa, que serán conectados a la mitad del arreglo (López et al., 2008)



Figura 8. Cables de conexión geófonos-sismógrafo. Elaboración propia.

Unidad de control y almacenamiento: se compone de un computador portátil, que tendrá instalado el sistema operativo GEA24 en que se establecerán los parámetros de adquisición y almacenarán los datos.

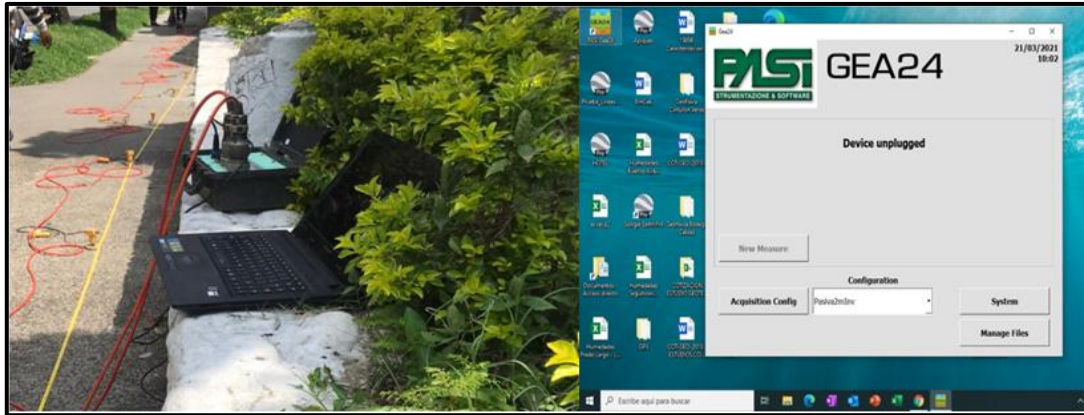


Figura 9. Unidad de almacenamiento y programa GEA24 para la adquisición. Elaboración propia (PASI, n.d.)

Fuente de energía: las ondas sísmicas que se utilizan en la refracción son generadas por un evento sísmico artificial instantáneo que lo que busca es generar ondas de volumen y superficiales producidas por un evento de duración instantánea que no permite la superposición de ondas de eventos diferentes en los movimientos del terreno detectados por los geófonos. Para esto se buscan fuentes que se puedan controlar en términos de inicio y localización (López et al., 2008). Existen dos tipos de fuentes de energía, las de impacto y con cargas explosivas. En este caso de estudio solo se usarán fuentes de impacto, las cuales están conformadas por un martillo de 25 libras, una placa móvil de concreto y el cable del trigger el cual permite el envío de la señal a la unidad de adquisición.



Figura 10. Martillo de 25 lb, placa y cable del trigger. Elaboración propia.

Para la adquisición de los datos, se instalan unos dispositivos receptores de señales, llamados geófonos (Figura 7) en línea recta sobre la superficie del suelo en estudio, los geófonos registran los movimientos verticales originados a partir de una fuente de ondas de superficie de tipo impulsiva que se ubicará estratégicamente y la cual llamaremos punto de disparo o

fuerza de energía (Figura 10), después de generar el tren de ondas sísmicas, se recopilan los datos para así con estos determinar los perfiles de velocidad de onda de corte. Para la adquisición óptima de los datos se requiere configuraciones de campo y parámetros iniciales de adquisición muy buenos para así garantizar perturbaciones que permitan diferenciar claramente ondas en su modo fundamental, las cuales aumentan la calidad de los datos en la curva de dispersión que se muestra en el procedimiento de análisis de datos (Suárez, 2017). En ocasiones existen dificultades inherentes al evaluar y distinguir la señal de ruido con solo un par de receptores, es por eso por lo que se hace necesario registrar varios disparos repetidos en múltiples puntos del terreno para garantizar una amplia nube de datos que permita la correcta recolección de datos y disminución de errores. El ruido disminuye la resolución de las mediciones de las ondas generadas, ya que cada tipo de ruido tiene distintas propiedades y velocidades, pero con la ayuda de este ensayo se permite la identificación de la mayoría del ruido a distintas frecuencias de fase de la fuente (Suárez, 2017).

4.3. Ensayo ASTM D5777-00

A continuación, se dan las especificaciones según la norma ASTM D5777-00 del 2011 para la realización del ensayo de refracción sísmica del suelo.

La medición de las condiciones del subsuelo mediante el método de refracción sísmica requiere de una fuente de energía sísmica, un cable de disparo, geófonos y un sismógrafo (ver Figura 11).

Los geófonos y la fuente de energía deben colocarse en contacto firme con el suelo, los geófonos suelen situarse en línea recta. La fuente sísmica puede ser un mazo que golpea el suelo. Los geófonos convierten las vibraciones del suelo en una señal eléctrica, esta señal es registrada y procesada por el sismógrafo.

La fuente de energía sísmica genera ondas elásticas que viajan a través del suelo o la roca desde la fuente. Cuando la onda sísmica alcanza la interfaz entre dos materiales de diferente velocidad sísmica, las ondas se refractan según la Ley de Snell. Cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo crítico en la interfaz, la onda refractada se mueve a lo largo de la interfaz entre dos materiales, transmitiendo la energía de vuelta a la superficie (ver Figura 11). Esta interfaz se denomina refractor.

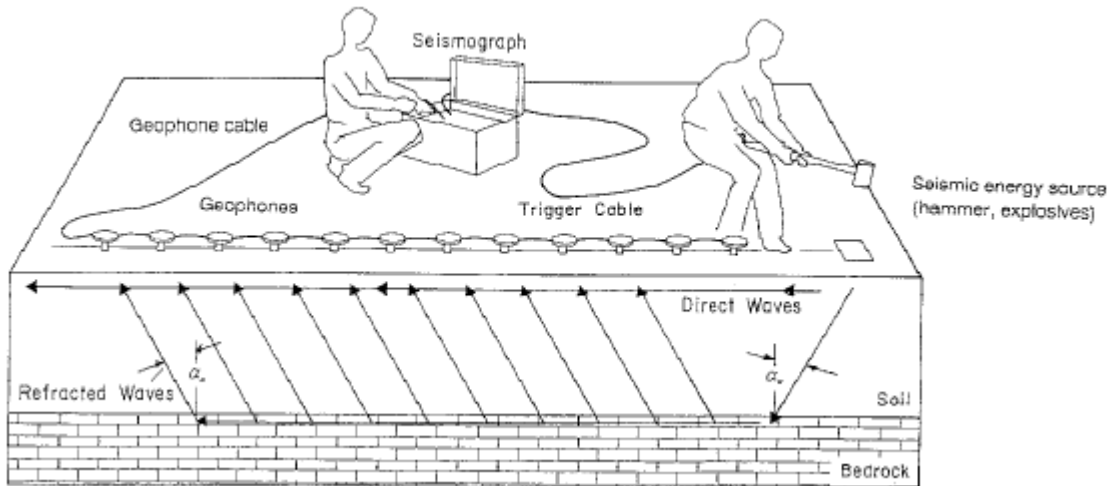


Figura 11. Esquema de proceso de adquisición de datos que muestra la trayectoria de las ondas directas y refractadas en un sistema de dos capas suelo/roca. Fuente: (ASTM D5777-00, 2011)

Los factores más relevantes a tener en cuenta en la ejecución del ensayo son: la calificación del personal, planificación de la prospección, aplicación del ensayo y la interpretación de datos de refracción sísmica.

4.3.1. Calificación del personal: el éxito de un estudio de refracción sísmica depende de la competencia de la(s) persona(s) responsable(s) para la planificación, realización de la inspección e interpretación de los datos. Se hace necesario comprender la teoría, los procedimientos en campo e interpretación de los datos, así como conocer la geología del lugar para la correcta inspección.

4.3.2. Planificación de la prospección: es de vital importancia la planificación cuidadosa y detallada del método de refracción sísmica, para esto se tienen en cuenta los siguientes puntos: el objetivo del estudio de refracción sísmica, evaluar el contraste de la velocidad sísmica, selección del enfoque y el diseño del ensayo.

- Objetivo del estudio de refracción sísmica: respecto a los objetivos del estudio de refracción sísmica, es importante el conocer la finalidad con la cual se pretende realizar y para que usarán los resultados, ya que esto definirá el tipo de inspección que se deberá ejecutar. Los tipos de inspecciones que se pueden realizar son: inspección de reconocimiento o preliminar y la inspección profunda o definitiva, lo que los diferencia es la cantidad de datos que se obtienen y el nivel de detalle de la inspección que se relaciona directamente con el procedimiento en campo y el costo.
- Evaluar el contraste de la velocidad sísmica: otro de los elementos críticos en la planificación de la prospección es la determinación de la existencia de un contraste o cambio de velocidad para la identificación de interés de unidades geológicas o hidrológicas. Existen tres tipos de pruebas de pre-inspección, que son: un perfil sísmico vertical, registros de sondeos o perforaciones y ensayo con una línea de inspección por refracción cerca de un punto de control conocido. Con esta información se asegura la viabilidad del ensayo.

- Selección del enfoque: el nivel de detalle deseado y la complejidad geológica del sitio determinará el método de interpretación a ser usado, lo que a su vez determinará los procedimientos de campo a seguir.
- Diseño del ensayo: Para el correcto diseño se deberá tener en cuenta la localización de las líneas de inspección la cual se hace con ayuda de mapas topográficos y fotos aéreas en el caso de no realizar una visita al lugar; y el otro aspecto para tener en cuenta es la cobertura y orientación de las líneas de inspección que cubran los objetivos de la inspección por refracción, por otro lado el área cubierta por la inspección podrá ser mayor que el área de interés, para que se tengan en cuenta todas las condiciones propias del lugar y percatarse de alguna situación anómala. El número y la localización de los puntos de disparo dependerá del método escogido para la adquisición e interpretación de los datos a su vez el espaciamiento de los geófonos es determinado por dos factores que son la profundidad esperada de la interfase o contacto geológico y la resolución lateral o grado de definición deseado de la interfase. La separación entre los geófonos y el punto de disparo será dependiendo de la profundidad de las interfases, siendo larga para interfaces profundas y cortas para las poco profundas.

4.3.3. Aplicación del ensayo:

Para la aplicación del ensayo se deben tener en cuenta un chequeo previo del plan de inspección del sitio de interés por medio de una inspección visual a ver qué tan factible es la ejecución del ensayo en el sitio, esto con el fin de hacer cambios si es necesario al plan de inspección original. Posterior a esto se realiza el procedimiento de campo que consistirá en:

- Localizar la mejor posición para las líneas de refracción basándose en el diseño del plan de inspección y la visita in situ realizada.
- Comprobar que exista espacio suficiente para trazar una línea lo más recta posible.
- Localizar la posición del primer geófono.
- Colocar los geófonos firmemente en el suelo y conectarlos al cable. Los geófonos deben estar de forma vertical y en contacto con el suelo o la roca. La incorrecta colocación de los geófonos da lugar a una mala señal de la onda P sísmica. Cada espiga del geófono debe introducirse firmemente en el suelo para que el contacto suelo-geófono sea lo más firme posible. Si el suelo está muy suelto los primeros centímetros, debe rasparse para que el geófono pueda implantarse en un suelo firme. Cuando la roca está expuesta en la superficie, la espiga del geófono puede sustituirse por una base plana que garantice un buen acoplamiento entre el suelo y los geófonos.
- Compruebe si hay corto circuito entre el cable y los geófonos o circuitos abiertos.
- Colocar la fuente en el primer punto de disparo o en un punto de prueba.
- Probar la fuente sísmica y el cable de disparo o trigger.
- Compruebe el nivel de ruido y ajuste las ganancias y los filtros.
- El grado de precisión requerido de la posición y la elevación de los puntos de disparo y los geófonos varía en función de los objetivos del proyecto. Si

el terreno es relativamente plano o la precisión del estudio de refracción no es crítica, la distancia entre la fuente y el geófono medida con una cinta métrica será suficiente.

- Proceda a las mediciones de refracción, asegurándose que existe una relación ruido/señal adecuada para poder determinar las primeras llegadas.

Se requieren seguir algunos procedimientos estándar y que se documenten para garantizar un control de calidad de las mediciones sísmicas de refracción, se recomiendan los siguientes elementos para proporcionar un control de calidad en las operaciones de campo y la adquisición de datos:

- Documentar los procedimientos y el método de interpretación que dicta los procedimientos en campo, así como las condiciones del lugar utilizado.
- Se recomienda revisar la calidad de los datos antes de registrar los datos digitales.
- Comprobar si las profundidades y las velocidades sísmicas obtenidas en el método de refracción tienen sentido geológico.

Se deben seguir las recomendaciones del fabricante para calibrar y estandarizar el equipo, si no se proporcionan tales recomendaciones se debe realizar una comprobación periódica del equipo. Antes de cada proyecto y antes de comenzar el trabajo de campo se debe realizar una comprobación del funcionamiento de equipo.

- 4.3.4. Interpretación de datos de refracción sísmica: existen varios manuales y programas informáticos para el procesamiento e interpretación de los datos, aunque la solución de estos métodos se puede llevar a cabo de forma manual es muy laborioso el proceso en el caso de métodos muy sofisticados.

Un problema inherente en todos los estudios geofísicos es la correlación no única entre los posibles modelos geológicos y un único conjunto de datos de campo. Esta ambigüedad solo se puede resolver mediante datos geológicos y un intérprete experimentado. El primer paso en la interpretación es determinar el intervalo de tiempo desde el impacto de la fuente sísmica hasta la primera llegada de energía a cada geófono, cuando estas primeras llegadas son nítidas y no hay ruido ambiental no se deben realizar correcciones y el proceso se hace más sencilla. En muchos casos el ruido en los datos dificulta la selección de los primeros arribos de llegada. Si se utiliza un programa informático para realizar las selecciones de primeras llegadas estas deben ser comprobadas por la persona que realiza el procesamiento y la interpretación.

La interpretación final de la refracción sísmica es usada para confirmar un modelo de la geología o hidrología del sitio en estudio. Este modelo es usualmente presentado como una sección transversal, un mapa de contornos o gráficos que ilustran las condiciones geológicas generales y alguna condición anómala en el lugar.

4.4. Trabajo de campo (Adquisición de datos)

Con la finalidad de contrastar la calidad de información en la adquisición del ensayo geofísico, se eligen seis sitios de estudio, todos dentro del Valle de Aburrá, pero que de acuerdo con las características de ubicación serán divididos para objeto de este trabajo en zonas urbanas y suburbanas con la finalidad de comparar la influencia de los diferentes ruidos según la ubicación de los proyectos.

4.4.1. Zonas Urbanas

Se caracterizan por encontrarse cerca de vías principales y barrios de la ciudad de Medellín que tienen una considerable afluencia vehicular y peatonal. A continuación, se presentan las ubicaciones urbanas para tres proyectos seleccionados.

Proyecto 1: corresponde a un edificio ubicado en el barrio Conquistadores, cercano a la avenida Bolivariana y al centro comercial Unicentro, como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Localización edificio Barrio Conquistadores (Tomada de Google Earth, 2020)

Proyecto 2: corresponde a la clínica Victoriana, ubicada en el centro de la ciudad, sobre la avenida oriental y cercana a la clínica Ces, como se muestra en la Figura 13.

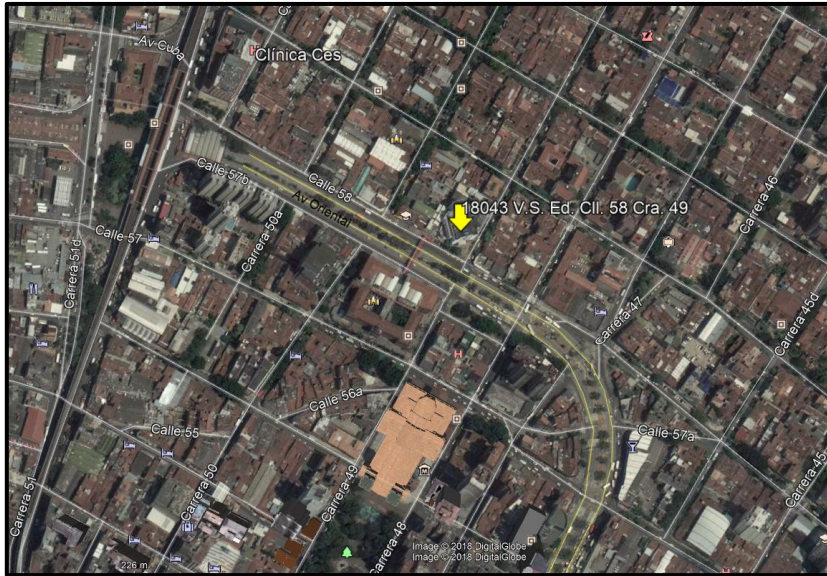


Figura 13. Localización Clínica Victoriana (Tomada de Google Earth, 2020)

Proyecto 3: corresponde al edificio Segurtronic, ubicado en el barrio La Floresta, sobre la avenida 80, y cercano a la estación Floresta del metro, como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Localización edificio Segurtronic (Tomada de Google Earth, 2020)

4.4.2. Zonas Suburbanas

Se caracterizan por encontrarse dentro de la ciudad de Medellín, pero no bajo la afluencia cercana de continuo tránsito peatonal ni vehicular, ya que estos proyectos están ubicados dentro de urbanizaciones o parcelaciones que solo son atravesadas por una vía que conecta toda la urbanización y en la cual el tráfico es poco significativo.

Proyecto 4: corresponde al lote 25 de la urbanización Cinturón verde (Ver Figura 15), la cual se encuentra sobre la avenida de las Palmas y cercana al primer mirador de las Palmas.

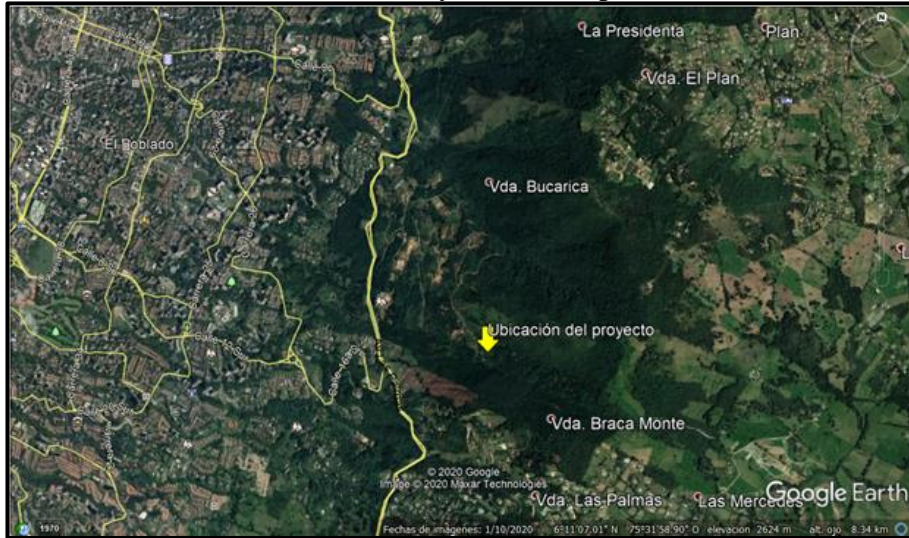


Figura 15. Localización de los lotes 25 y 78 de la urbanización Cinturón Verde (Tomada de Google Earth, 2020).

Proyecto 5: corresponde al lote 78 de la urbanización Cinturón verde (Ver Figura 15), la cual se encuentra sobre la avenida de las Palmas y cercana al primer mirador de las Palmas.

Proyecto 6: corresponde al lote 77 de la parcelación Mirador del Poblado, la cual se encuentra sobre la avenida las Palmas, como se muestra en la Figura 16.

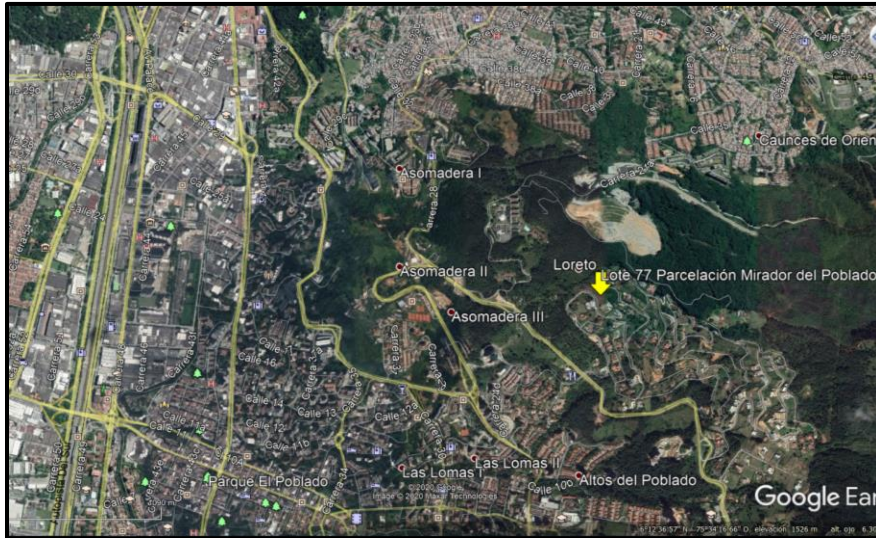


Figura 16. Localización de la parcelación Mirador del Poblado (Tomada de Google Earth, 2020).

A partir de las visitas a campo se identifica la topografía de cada uno de los proyectos, las condiciones ambientales al momento de la adquisición de datos, y cada uno de los factores influyentes y para tener en cuenta en la adquisición.

Tomando en consideración la norma para el desarrollo del ensayo de refracción, se construye el tendido sísmico teniendo en cuenta unas características iniciales mostradas en la Tabla 1, a partir de este punto se alinean 19 geófonos que son los dispuestos por la empresa Línea Sísmica espaciados la misma distancia según las especificaciones del ingeniero geotecnista puesto que es quien sabrá las distancias que necesita cubrir con el ensayo de refracción MASW, para los ensayos seleccionados se tendrán las configuraciones iniciales mostradas en la Tabla 2.

Para todos los proyectos seleccionados se presentan las mismas condiciones geométricas iniciales y topografías similares, que se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los ensayos
Fuente: Elaboración propia.

GEOMETRÍA GENERAL	
Tipo de arreglo	Lineal
Cantidad de geófonos de 4.5 Hz	19
Condición topográfica	Plana

Tipo de fuente	Percusión
Posición inicial 1er geófono (m)	0
Cantidad de golpes	11

Definidos los parámetros geométricos se tendrán, entonces, diferentes distanciamientos de geófonos en los terrenos teniendo en cuenta como se hizo la distribución en cada uno de los proyectos (Ver Tabla 2).

*Tabla 2. Configuración inicial de los geófonos en campo.
Fuente: Elaboración propia*

(a)

(b)

CONFIGURACIÓN INICIAL		CONFIGURACIÓN INICIAL	
Separación entre geófonos (m)	2	Separación entre geófonos (m)	1
Separación de la fuente (m)	4	Separación de la fuente (m)	2
Posición inicial de la fuente	-1	Posición inicial de la fuente	-0.5

A continuación, se muestra un registro fotográfico del día de la exploración de campo en cada lugar seleccionado, donde se muestra como quedó organizado el tendido sísmico para cada proyecto.



Figura 17. Exploración de campo Proyecto 1. Elaboración propia.



Figura 18. Exploración de campo proyecto 2. Elaboración propia.



Figura 19. Exploración de campo Proyecto 3. Elaboración propia.



Figura 20. Exploración de campo Proyecto 4. Elaboración propia.



Figura 21. Exploración de campo Proyecto 5. Elaboración propia.



Figura 22. Exploración de campo Proyecto 6. Elaboración propia

5. Resultados y análisis

Al momento del análisis se le entregan los datos extraídos en campo al ingeniero geotecnista, el cual por medio del programa SeisImager procesa los resultados y determina las curvas de dispersión, las cuales son el objeto de análisis de este trabajo para la posterior identificación de errores en la toma del ensayo, a partir de esta se pueden identificar los modos de vibración que se presentan en el suelo, las cuales permitirán percatarse si existen errores en la toma de ensayos aquí se pretende contrastar dichas gráficas con el reporte de campo y ver la influencia que tienen las condiciones ambientales e in situ a la hora de realizar el ensayo.

Se obtienen los gráficos de dispersión, los cuales nos muestran el espectro de energía en función del contenido frecuencial y de las velocidades de onda de fase con la indicación del modo fundamental por medio de los puntos rojos. En el Gráfico 3 tomado del manual del programa SeisImager, se presenta un comportamiento de una buena práctica o de un resultado que no presenta influencia de ruido frecuencial que haga variar el modo fundamental de vibración del suelo, en el cual nos basaremos para la determinación de los posibles errores y por medio de las condiciones especiales presentadas en cada toma de los seis ensayos seleccionados, estimar cuáles fueron los posibles causantes de las variaciones.

A continuación, se presentan los reportes de campo, la curva de dispersión resultante del procesamiento y los análisis correspondientes a cada uno de los proyectos descritos con anterioridad en el trabajo de campo.

- El proyecto 1 se encuentra en una zona residencial de la ciudad, el ensayo se realizó en horas de la tarde, el flujo de tráfico y peatones fue reducido y se tuvo un clima despejado lo cual nos imprimió ruido a la hora del ensayo y facilitó mucho la toma de este. En la Tabla 2(b) se muestra la configuración inicial utilizada para el ensayo.

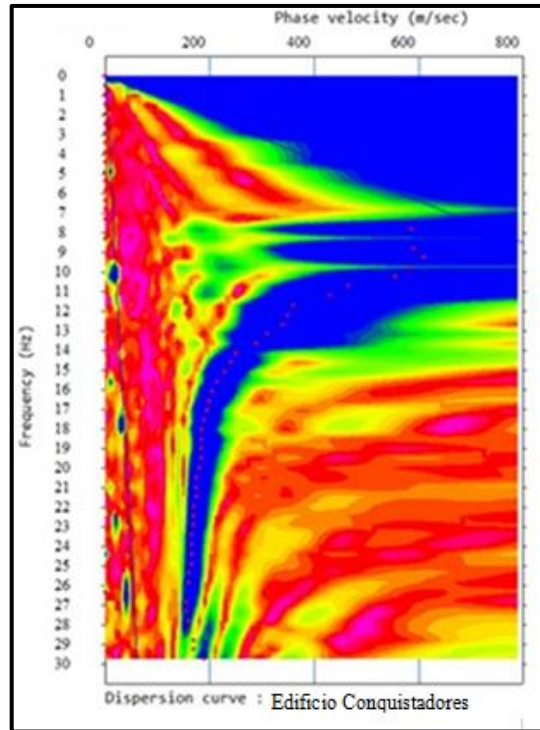


Figura 23. Curva de dispersión proyecto 1.

En el gráfico se muestra una curva de dispersión en la que es sencilla diferenciar el modo fundamental de vibración del suelo y donde no se evidencian modos lo que hace que la información presente una buena calidad en los datos, según el reporte que se da del día de la adquisición y a pesar de que el proyecto se encuentra en una zona residencial

- El proyecto 2, se ubica en una de las vías más transitadas de la ciudad de Medellín. Se intentó realizar las mediciones por la mañana, pero no fue lo suficientemente temprano ya que había muchísimo tráfico no solo de autos sino de peatones, los cuales pasaban al lado de los geófonos y entorpecen la adquisición, también se escuchaba mucho ruido alrededor, autos que entraban y salían del parqueadero de la clínica, todo esto nos agregaba bastante ruido frecuencial al ensayo. El clima no agregó más frecuencia, ya que a pesar de estar bastante nublado no se presentaron lluvias y lloviznas. En la Tabla 2(a) se muestran la configuración inicial del tendido.

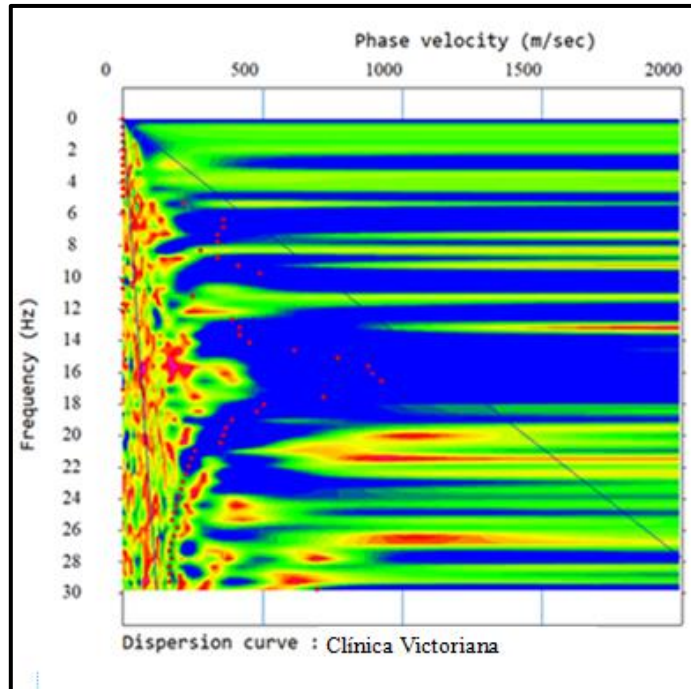


Figura 24. Curva de dispersión proyecto 2.

Los resultados del gráfico de dispersión del proyecto 2 se ven afectados por el alto tráfico de la zona en el momento de la adquisición, haciendo que la tendencia de la curva se pierda con la presencia de modos superiores de vibración.

- El proyecto 3 se ubica sobre la avenida 80, vía muy concurrida de la ciudad y cerca a la estación Floresta del metro. Con el fin de evitar el tráfico y el alto flujo de trenes pasando se hizo el ensayo en horas de la madrugada, para minimizar estos factores, pero se hacía imposible no tenerlos, puesto que incluso en un horario tan temprano se tenía un tráfico significativo no solo de autos, sino también de peatones caminando cerca a la hora de la toma que si bien no eran los mismos que se presentan en un horario habitual si nos crean alteraciones en los resultados. No se presentaron alteraciones por el clima, puesto que no hubo lluvias que afectaran aún más el ensayo. En la Tabla 2(a) se muestra la configuración utilizada para los geófonos.

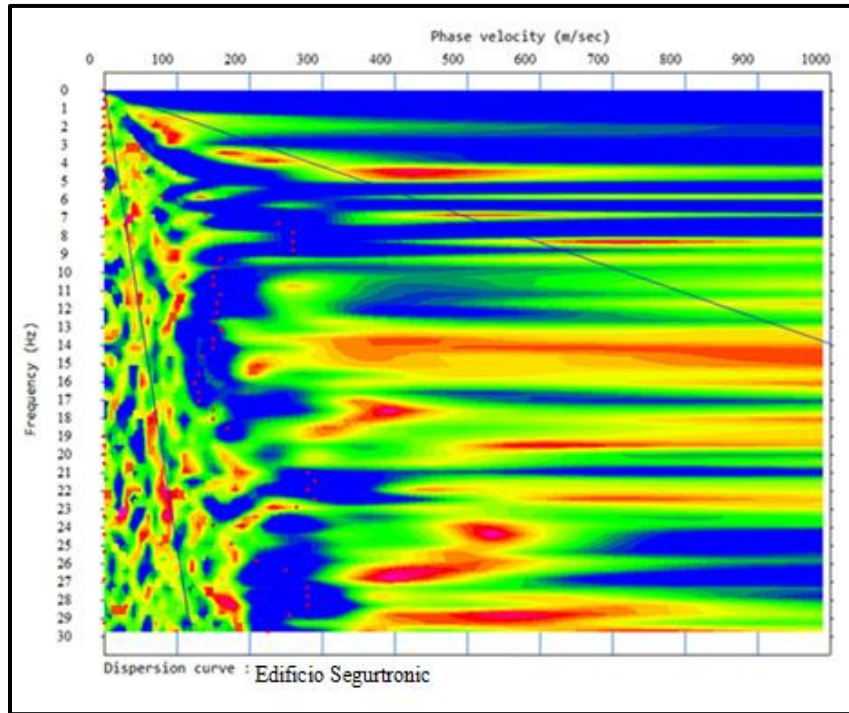


Figura 25. Curva de dispersión proyecto 3.

De la Figura 25 se concluye que para el proyecto 3 no hubo buenas prácticas al momento de la adquisición de datos, ya que es muy confuso distinguir de manera clara la tendencia del modo fundamental del suelo, si se contrasta el gráfico con el reporte de campo se puede evidenciar que, a pesar de haber tenido la precaución de realizar el ensayo en horas de la madrugada, este único cuidado en la práctica se queda corto para obtener un buen resultado en la información.

- El proyecto 4 se ubica en el lote de una urbanización que no se ve afectada por peatones o mucho tránsito vehicular ya que las distancias de una vivienda a otra son bastante significativas. El lote es atravesado por dos quebradas, una a cada lado, las cuales son poco profundas y muy rápidas, el día que se tomó el ensayo se estaba presentando llovizna leve, estas dos situaciones son de gran importancia ya que ambas agregan ruido de alta frecuencia al ensayo. En la Tabla 2(a) se muestra la configuración utilizada.

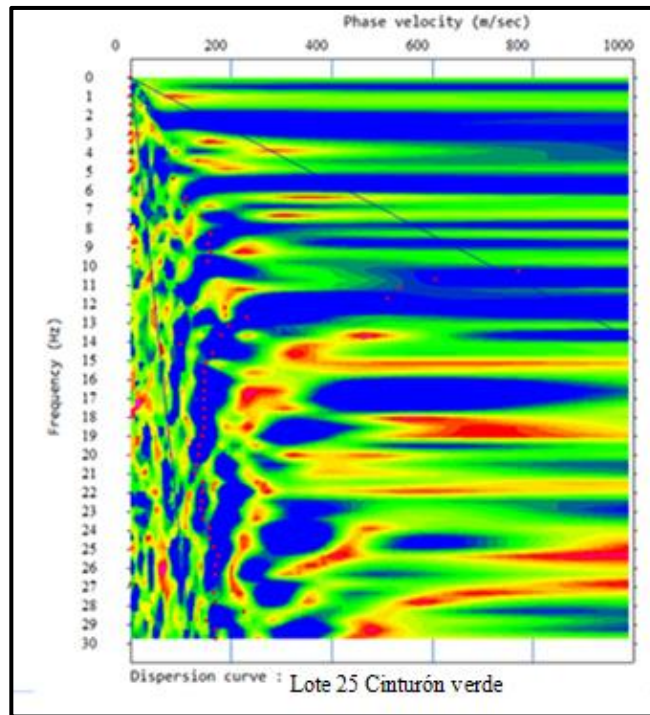


Figura 26. Curva de dispersión proyecto 4.

Las condiciones que se presentaron al momento de la adquisición de datos hicieron que la tendencia de la curva de dispersión de la Figura 26 no fuera continua, también se debe tener en cuenta que las quebradas que atraviesan el lote aportan ruido que es percibido por los geófonos y alteran la calidad de los datos.

- El proyecto 5 se ubica en el lote de una urbanización que no se ve afectada por peatones o mucho tránsito vehicular ya que las distancias de una vivienda a otra son bastante significativas. El lote al día de la adquisición presentaba bastante rastrojo seco en el suelo, producto de muchos pinos sembrados con anterioridad, lo que dificultó la ubicación de los geófonos, también estaban talando con una sierra cerca al lugar donde se realizó el tendido sísmico lo que aportaba bastante ruido al ensayo y aunque el día estuvo nublado no se presentaron lluvias o lloviznas que alteraran aún más las mediciones. En la Tabla 2(a) se muestra la configuración de cómo se distanciaron los geófonos en campo.

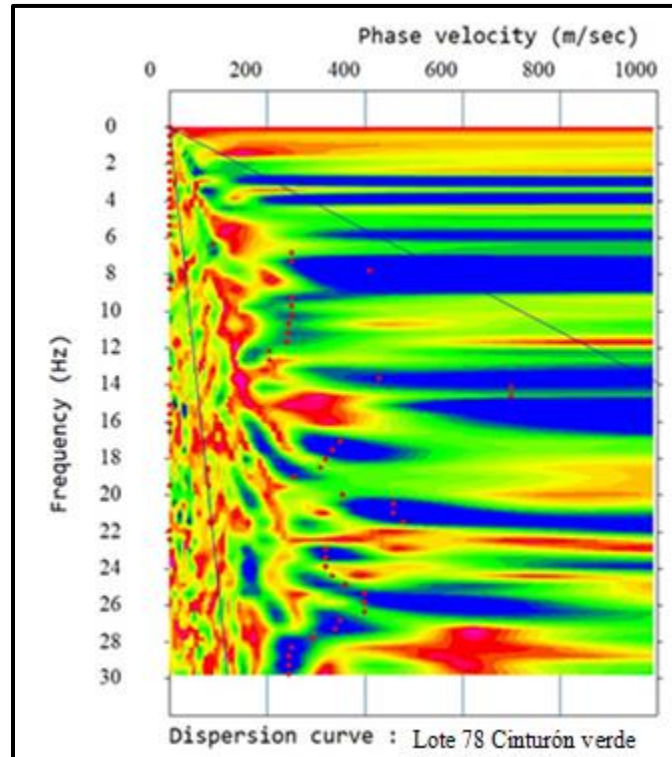


Figura 27. Curva de dispersión proyecto 5.

En este proyecto es claro gracias a la Figura 27 y al reporte de campo que los factores que se presentaron al momento del ensayo fueron los causantes de que la tendencia de la curva de dispersión no fuera continua y también difuso el reconocimiento del modo fundamental, lo que hace a los datos poco confiables para determinar un valor de velocidad de onda de corte.

- El proyecto 6 se ubica dentro de una parcelación que no es altamente influenciada por el tráfico. Para el día de la adquisición se presentaron buenas condiciones en la toma del ensayo, ya que no se tenían ruidos de alta frecuencia que variaran las mediciones, también ayudó mucho el clima el día del ensayo debido que fue completamente soleado, a pesar de la presencia significativa de grama en el lote no se tuvo problema en la ubicación de los geófonos. configuración. En la Tabla 2(b) se muestra la configuración utilizada de cómo se distanciaron los geófonos en campo.

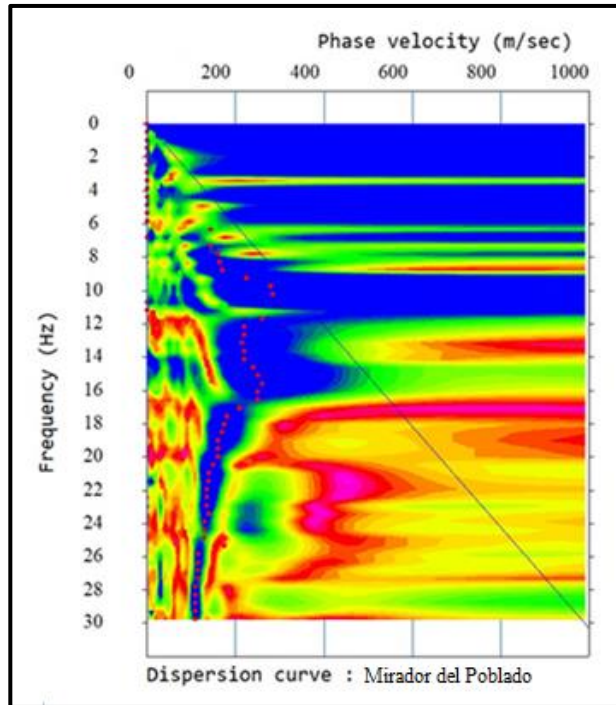


Figura 28. Curva de dispersión proyecto 6.

A partir de la Figura 28 se puede ver que, aunque la tendencia de la curva no es del todo clara, los datos no presentan tanta presencia de modos superiores de vibración, lo que hace que los datos sean confiables.

Al observar las gráficas provenientes del procesamiento se puede distinguir la influencia en la calidad de los datos, los factores ambientales y el tráfico. Es por esto por lo que, al pensar en realizar buena praxis debemos cavilar sobre diversos factores para que la información no se tergiverse en gran medida y se pueda apreciar una tendencia clara, y buena representación de ese modo fundamental.

6. Recomendaciones

- Se recomienda realizar la adquisición de los datos que se procesarán en días soleados o en días en los que no se presenten chubascos o lloviznas que agreguen ruido frecuencial al ensayo.
- Se recomienda que al momento de estar tomando las mediciones no estén personas caminando o hablando cerca de los geófonos, ya que esto puede afectar el modo fundamental de vibración que se muestra en la curva de dispersión.
- En lugares donde se deba tomar el ensayo y se presente alto tráfico peatonal y vehicular se recomienda hacer la adquisición en altas horas de la madrugada, con el fin de minimizar el mayor ruido posible que estos agregan al ensayo.
- Se recomienda hacer una limpieza previa del lote si se encuentra en una situación alta de vegetación o rastrojo para permitir un correcto acople de los geófonos al suelo.
- Tomar varias lecturas de golpes que permita crear una nube de datos en la cual sea posible seleccionar una lectura que nos determine un valor de velocidad de onda cortante confiable.
- Si se presenta una variación al momento que se esté realizando el ensayo y esta es persistente, pero se puede esperar a que termine, es recomendable parar el ensayo mientras termina de acontecer el suceso y retomar cuando ya no interrumpa la adquisición.
- Cuando se realicen mediciones en zonas urbanas, verificar el espacio que se tiene para el ensayo ya que, si es muy limitado la separación de los geófonos no va a ser suficiente, en estas situaciones es recomendable pedir permiso a los vecinos del rededor para contar con mayor espacio para la adquisición.
- Se recomienda que la persona que vaya a realizar el golpeo con el martillo se quede quieta al momento justo después de golpear, para que su movimiento no agregue más contenido frecuencial al ensayo.
- Se recomienda que el desarrollo del ensayo se haga por personal capacitado y con experiencia ya que de esto depende en gran medida la calidad de los datos y la correcta determinación de los perfiles de velocidad.

7. Conclusiones

En conclusión, se pudo evidenciar algunos factores a tener en cuenta al momento de realizar la línea geofísica. Dentro de los principales, se encuentra la ubicación en donde se realizará el ensayo de refracción ya que, conociendo la misma, se podría tener indicios del terreno a explorar; así mismo, se debe realizar la previa inspección del equipo con el fin de confirmar

su correcto funcionamiento y evitar percances en campo. Posteriormente, es importante reconocer los espectros de dispersión, este, es un paso clave para la detección de modos fundamentales y superiores de vibración del suelo, ya que, brindará indicios de la confiabilidad de los datos.

Ahora bien, en cuanto a la adquisición de datos, es importante tener en cuenta que para horizontes de suelo similares dichos datos podrían variar dado que, no solo dependen de la geología o topografía del lugar, sino que también lo hacen de las condiciones in situ al momento de la toma. Asimismo, el éxito del ensayo geofísico de refracción, si bien depende en un gran porcentaje de la calidad de datos tomados en campo, también resalta la experiencia y buen criterio por parte de la persona encargada del procedimiento.

Es importante mencionar que, si la calidad de los datos adquiridos en campo no es del todo satisfactoria, se pueden corregir eliminando un porcentaje de datos por medio del programa de procesamiento Seisimager, esto, depende del criterio del operador del programa, sin embargo, no es lo más recomendable hacerlo al momento de analizar los datos.

Finalmente, la información recogida durante el proceso de ejecución de este proyecto puede ser de utilidad para la orientación de decisiones futuras relacionadas a la implementación de nuevos ensayos y, en materia de capacitación para caracterizar los suelos.

8. Referencias

- Alvarado, G. (1959). *Tratado De Geofísica Aplicada*. Retrieved April 25, 2021, from https://www.academia.edu/31851873/Figuerola_Cantos_Tratado_De_Geofisica_Aplicada
- ASTM International. (2011). Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. *ASTM International*, 1–14. <https://doi.org/10.1520/d5777-00r11e01>
- Foti, S., Lai, C., Rix, G. J., & Strobbia, C. (2014). *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization (English Edition)* (1st ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17268>
- Geoseismic. (2017b, November 3). ¿Qué es la Refracción Sísmica y para qué se usa? Retrieved April 20, 2021, from <http://www.geoseismic.cl/la-refraccion-sismica/>
- Geoseismic. (2017a, September 11). Método Sísmico de Refracción de Microtremores (ReMi). Retrieved April 18, 2021, from <http://www.geoseismic.cl/metodo-sismico-refraccion-microtremores-remi/>
- CEDEX, (2019). Técnicas geofísicas. Retrieved April 20, 2021, from <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/C63444EB-3A5F-4346-9CE0-AF209AB125F1/132409/ENSAYOSGEOFISICOS.pdf>

- GEOSYSTEM, Z. (2010). *ENSAYOS GEOFÍSICOS POR LOS MÉTODOS DE MASW Y MAM PARA EL ÁREA DE EMPLAZAMIENTO DEL PUENTE QUILCA*. Retrieved April 20, 2021, from http://gis.proviasnac.gob.pe/expedientes/2012/LP0024-2012/Disco01/01.%20VOLUMEN%20I/02.%20ESTUDIOS%20BASICOS/04.%20GEOLOGIA_GEOTECNIA/02.%20TOMO%20II/05.%20ANEXO%2008_%20DEL%20PUENTE/07.%20ANEXO%208.6_%20ENSAYO%20GEOFISICO/01.%20ENSAYO%20GEOFISICO.pdf
- Humire, F., Sáez, E., & Leyton, F. (2015). *Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro Vs30*. Retrieved April 25, 2021, from https://iconstruccion.cl/documentos_sitio/19049_manual.pdf
- López, J. M., Mejía, J. A., & Vega, N. D. (2008). “*APLICACIÓN DEL METODO DE REFRACCION SISMICA PARA LA DETERMINACION DE VELOCIDADES DE ONDAS P.*” Retrieved April 20, 2021, from <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4379/1/Aplicaci%C3%B3n%20del%20m%C3%A9todo%20de%20refracci%C3%B3n%20sismica%20para%20la%20determinaci%C3%B3n%20de%20velocidades%20de%20ondas%20P.pdf>
- PASI. (n.d.). Programa *TECHNICAL SPECIFICATIONS GEA 24*. Retrieved April 22, 2021, from www.pasigeophysics.com
- Rivas, R. A. (2016). *Efecto en la curva de dispersión a través del método MASW, al realizar variaciones en el peso de la fuente activa y el tipo placa*. Retrieved April 23, 2021, from http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2240/1/Rivas_Lucero_Rodrigo_Arturo.pdf
- Suárez, L. R. (2017). *Optimización de parámetros para adquisición de datos medidos in situ por medio del método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)*. Retrieved April 17, 2021, from <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23575/3560900258445UTFSM.pdf>
- Villamizar, J. D. J. (2011). *Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: estado del arte*. Retrieved April 15, 2021, from <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/C63444EB-3A5F-4346-9CE0-AF209AB125F1/132409/ENSAYOSGEOFISICOS.pdf>
- Wave, S., & Acquisition, D. (2005). *SeisImager/SW Manual*. Retrieved April 18, 2021, from file:///C:/Users/HP14-AC186/Downloads/SeisImagerSW_Manual_v1.4.pdf