



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

“Uso de pruebas geofísicas de Velocidades de Onda (Vs) para comparar las diferencias entre suelo virgen, suelo con relleno compactado y relleno compactado con pilotes hincados en la estación 5 de la Aerovía”

AUTOR:

CHRISTIAN ALEJANDRO MINUCHE SANTANA

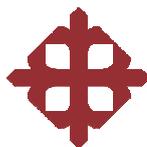
**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

ING. JOSÉ BARROS CABEZAS

Guayaquil, Ecuador

9 de Septiembre del 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por Minuche Santana Christian Alejandro, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

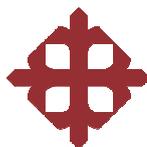
TUTOR

f. _____
José Andrés Barros Cabezas

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. _____
Stefany Esther Alcivar Bastidas

Guayaquil, a los 9 días del mes de Septiembre del año 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Minuche Santana Christian Alejandro**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, “**Uso de pruebas geofísicas de Velocidades de Onda (Vs) para comparar las diferencias entre suelo virgen, suelo con relleno compactado y relleno compactado con pilotes hincados en la estación 5 de la Aerovía**” previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 9 días del mes de Septiembre del año 2019

EL AUTOR

f. _____
Minuche Santana Christian Alejandro



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE CIVIL**

AUTORIZACIÓN

Yo, **Minuche Santana Christian Alejandro**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **“Uso de pruebas geofísicas de Velocidades de Onda (Vs) para comparar las diferencias entre suelo virgen, suelo con relleno compactado y relleno compactado con pilotes hincados en la estación 5 de la Aerovía”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 9 días del mes de Septiembre del año 2019

EL AUTOR:

f. _____
Minuche Santana Christian Alejandro

Urkund Analysis Result

Analysed Document: FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL TESIS MINUCHE CHRISTIAN
URKUND 1.docx (D55211495)
Submitted: 9/2/2019 7:09:00 PM
Submitted By: claglas@hotmail.com
Significance: 2 %

Sources included in the report:

TRABAJO DE TITULO BRAYAN QUEVEDO.doc (D40968786)
84fc9ea7-2a43-4074-a95f-aed90f0a957b

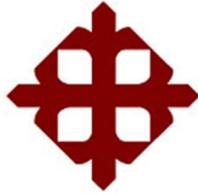
Instances where selected sources appear:

2

AGRADECIMIENTO

Principalmente quiero agradecer a mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme profesionalmente y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo, por ayudarme a superar todos los problemas y alentándome a seguir adelante.

De manera especial a mi tutor el Ing. José Barros y mi oponente y previo tutor el Ing. Adolfo Caicedo por haberme guiado en la elaboración de este trabajo de titulación y por haberme brindado el apoyo necesario para cumplir con esta meta.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

f. _____

ING. JOSÉ ANDRÉS BARROS CABEZAS
TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

ING. STEFANY ESTHER ALCÍVAR BASTIDAS
DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

ING. JAIME FRANCISCO HERNANDEZ BARREDO
DOCENTE DE LA CARRERA

f. _____

ING. ADOLGO CAICEDO ASPIAZU
OPONENTE

Índice general

Introducción.....	2
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo general.....	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
1.2. Alcance.....	3
1.3. Metodología.....	3
2. Antecedentes.....	5
2.1. Aerovía.....	5
2.1.1. Consideraciones Estación 5.....	6
2.2. Ensayo MASW.....	7
2.3. Herramientas para MASW.....	7
2.3.1. Procesamiento de datos.....	9
2.3.2. Proceso de datos.....	9
2.3.3. Limpieza de los puntos.....	11
2.3.4. Algoritmo DINVER.....	13
2.3.5. Proceso de inversión.....	14
3. Marco Teórico.....	16
3.1. Métodos Geofísicos para la exploración de suelo en la Ingeniería.....	16
3.2. Métodos basados en ondas superficiales para estimar el perfil de Vs.....	20
3.3. Recolección de datos.....	20
3.4. Determinación de la curva de dispersión.....	21
3.5. Estimación del perfil de Vs (Inversión).....	22
3.6. Fuente activa (Ensayos MASW Activos).....	23
3.7. Geófonos.....	24
3.8. Arreglos.....	24

3.9. Transformada de Fourier.....	24
4. Ventajas de MASW.....	25
5. Desventajas MASW.....	25
6. Resultados.....	26
6.1. Metodología MASW.....	26
6.2. Resultados de sondeos.....	27
6.2.1. Terreno Natural.....	27
6.2.2. Terreno Rellenado.....	30
6.2.3. Terreno con Relleno y Pilotes.....	32
6.3. Resumen y discusión de resultados.....	36
Bibliografía.....	38

Índice de Tablas

TABLA 1. PROFUNDIDADES Y VELOCIDADES DE ONDA DEL PERFIL #1 DE TERRENO NATURAL.....	28
TABLA 2. PROFUNDIDADES Y VELOCIDADES DE ONDA DEL PERFIL #2 DE TERRENO NATURAL.....	28
TABLA 3. PROFUNDIDADES Y LAS VELOCIDADES DE ONDA DEL PERFIL #3 DE TERRENO NATURAL.....	29
TABLA 4. PROFUNDIDADES Y LAS VELOCIDADES DE ONDA DEL PERFIL #1 DEL TERRENO RELLENADO.....	30
TABLA 5. PROFUNDIDADES Y LAS VELOCIDADES DE ONDA DEL PERFIL #2 DEL TERRENO RELLENADO.....	31
TABLA 6. PROFUNDIDADES Y LAS VELOCIDADES DE ONDA DEL PERFIL #3 DEL TERRENO RELLENADO.....	31
TABLA 7. PROFUNDIDADES Y VELOCIDADES DE ONDA DEL PERFIL #1 DEL TERRENO CON PILOTES.....	33
TABLA 8. PROFUNDIDADES Y LAS VELOCIDADES DE ONDA DEL PERFIL #2 DEL TERRENO CON PILOTES.....	33
TABLA 9. PROFUNDIDADES Y VELOCIDADES DE ONDA DEL PERFIL #3 DEL TERRENO CON PILOTES.....	34

Índice de Ilustraciones

FIGURA 1. TRAZADO GENERAL DEL ALINEAMIENTO DEL PROYECTO DE AEROVÍA. TRAMO: DURÁN - MALECÓN 2000 - ESTACIÓN TÉCNICA - JULIÁN CORONEL - PARQUE CENTENARIO.....	6
FIGURA 2. UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN 5	7
FIGURA 3. SISMÓGRAFO, GEODE Y BATERÍA.	8
FIGURA 4. ARREGLO DE CABLES.....	8
FIGURA 5. GEÓFONO CON PUNTA.....	8
FIGURA 6. MARTILLO DE 8KG Y PLATO DE IMPACTO.....	8
FIGURA 7. INTERFAZ DE SEISMODULE CONTROLLER.	9
FIGURA 8. HOJA DE CÁLCULO EN MATLAB DESARROLLADA POR EL DR. WOOD EN DONDE SE INGRESAN LOS PARÁMETROS REFERENTES AL ENSAYO.....	10
FIGURA 9. SELECCIÓN DE TIPO DE ARCHIVO A ANALIZAR.	10
FIGURA 10. CURVA DE DISPERSIÓN, VELOCIDAD VS FRECUENCIA.	11
FIGURA 11. HOJA DE CÁLCULO DONDE SE INGRESAN LOS PARÁMETROS DE VELOCIDADES, FRECUENCIAS Y LONGITUDES DE ONDAS.	12
FIGURA 12. GRÁFICO LUEGO DE LA CORRIDA.	13
FIGURA 13. GRÁFICO LUEGO DE LIMPIEZA.....	13
FIGURA 14. CURVAS DE VELOCIDAD VS FRECUENCIA DEL SUELO.....	14
FIGURA 15. PROGRAMA WINSASW DONDE SE MUESTRA LA TABLA DE PARÁMETROS Y LA CURVA DE DISPERSIÓN.....	15
FIGURA 16. DIAGRAMA DE LOS PROCESOS PARA REALIZAR UN ENSAYO MASW.	26
FIGURA 17. GRÁFICO DE VS DE TERRENO NATURAL.....	27
FIGURA 18. GRÁFICO DE VS DE TERRENO RELLENADO.....	30
FIGURA 19. GRÁFICO DE VS DE TERRENO CON PILOTES.....	32
FIGURA 20. GRÁFICO DE VS DE LOS 3 TERRENOS.	35

Resumen

La evaluación del suelo presente en un terreno es vital a la hora de empezar una obra civil, es por esto que se estudia la posibilidad de encontrar nuevos métodos que simplifiquen y agilicen el trabajo de los ingenieros civiles. De aquí parte el estudio de las ondas superficiales y su aplicación en la geotecnia como un método que no altera el terreno y proporciona datos necesarios a priori al comienzo de una obra civil.

El objetivo de esta investigación es usar el método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales para determinar si en realidad cambia el suelo debajo de diferentes tipos de cimentaciones y de qué manera afecta la misma a las propiedades mecánicas. Es decir, si el suelo se hace más resistente debido al peso y a la posterior consolidación o se mantiene en el mismo estado.

Se consiguieron dichos resultados mediante ensayos en campo, procesamiento en oficina y el uso de programas de computadora que permitieron procesar los datos adquiridos en campo.

Una vez que se obtuvieron los gráficos de las Velocidades de Onda de cada terreno, se procedió a analizar y ver que las cimentaciones superficiales no alteran de sobremanera el suelo que está por debajo. En el caso del terreno con pilotes se obtuvieron velocidades de onda bastante prometedoras comparándolas con los otros terrenos analizados. En algunos ensayos de pilotes se llegó a casi duplicar la velocidad del terreno natural.

Abstract

The evaluation of the soil is of great concern when starting an engineering project, which is why there is so many research and new methods are found so that they simplify and expedite the work of civil engineers. Hence the study of surface waves and their application in geotechnics as a method that does not alter the terrain and provides necessary data at the beginning of a construction project.

The main objective in this research is to use the Multichannel Analysis Surface Wave method to determine if the soil actually changes under different types of foundations and how it affects the mechanical properties. This is, if the soil becomes more resistant due to weight and subsequent consolidation or remains in the same state.

These results were achieved through field trials, office processing and the use of computer programs that allowed the data acquired in the field to be processed.

Once the graphs of the Wave Velocity of each terrain were obtained, we proceeded to analyze and see that the shallow foundations do not alter the ground below. In the case of the terrain with piles (Deep foundation), quite promising wave speeds were obtained by comparing them with the other terrain analyzed. In some pile tests, the speed of the natural terrain was almost doubled.

Introducción.

El estudio de las propiedades de los suelos es una tarea necesaria en toda obra civil por lo que se buscan nuevas formas que lo faciliten, entre estas está la geofísica que ha demostrado ser muy útil para obtener parámetros en menor tiempo agilitando el estudio de un suelo. La teoría de la propagación de ondas, procesamiento de señales e inversión, resumidas en los ensayos MASW, MAM, REMI, entre otros, suponen un gran avance para la ingeniería de suelos, al ser una prueba no destructiva, es decir que no altera el terreno, es una muy buena opción al momento de evaluar las características de un suelo sin perturbarlo. Los ensayos MASW (*Multi Channel Analysis Seismic Wave*) son relativamente rápidos en terreno, pudiendo hacer el procesamiento en una oficina y obteniendo resultados relativamente precisos.

Ahora bien, dependiendo del tipo de obra se debe escoger una cimentación adecuada que soporte las cargas que bajarán por la estructura.

En este trabajo se evaluarán tipos de cimentaciones superficiales y profundas en tres terrenos: virgen o terreno natural, suelo con relleno material de préstamo importado y suelo con relleno de 1 metro de material de préstamo importado y con pilotes hincados. Debido a los cambios en los terrenos, (tales como las cargas del material importado, la compactación, entre otros), las propiedades del suelo debajo del relleno deberían mejorar, obteniendo en los ensayos velocidades de onda de corte (V_s) mayores en relación al terreno virgen. Con este trabajo se pretende, mediante los ensayos MASW, obtener datos que permitan evaluar el estado de un suelo luego de haber sido perturbado con algún tipo de obra civil.

1.1. Objetivos.

1.1.1. Objetivo general.

- Utilizando perfiles de Velocidad de Onda por medio de ensayos MASW, se propone analizar el uso de dichas pruebas para determinar las propiedades del suelo y realizar una comparación entre suelo virgen/ suelo relleno y suelo con pilotes hincados.

1.1.2. Objetivos específicos.

- Realizar ensayos MASW en un suelo virgen
- Realizar ensayos MASW en un suelo relleno
- Realizar ensayos MASW en un suelo relleno y con pilotes
- Realizar perfiles (Vs) utilizando los ensayos MASW.
- Comparar los resultados obtenidos y consecuentemente analizarlos.
- Evaluar el cambio en las propiedades de los suelos en estudio.

1.2. Alcance.

El diseño de una cimentación con relleno sugiere que las propiedades del terreno cambiarán según las solicitaciones de la obra lo requieran; con el uso de pruebas geofísicas (MASW) para estimar el VS (velocidad de onda) y rigidez, se plantea observar cómo han cambiado estas propiedades, y cuánto han mejorado las condiciones del suelo.

Este trabajo tiene como finalidad evaluar si los ensayos MASW tienen la capacidad de proporcionar información sobre los cambios en un terreno luego de realizado un trabajo ingenieril.

1.3. Metodología.

Procedimiento de Campo para recolección de datos:

- Revisión del Sitio: Se verifica que no se generen ruidos, pequeños temblores por paso de vehículos o maquinaria que pudiere afectar a la recolección de datos. Por lo general se hace los ensayos de madrugada o en la noche.
- Configuración del Arreglo: Es necesario calcular la distancia de los geófonos, la distancia a la que se golpeará el plato, por lo que se debe seleccionar el lugar en donde se harán los arreglos de los geófonos y limpiar el sitio en caso de que haya algún tipo de maleza que pueda entrar en contacto con los geófonos.

- Obtención de datos: Recolección de datos de campo mediante el “SEISMODULE” que procesa ondas sísmicas generadas por un agente externo y son receptadas por los geófonos en el terreno.

Procedimiento de Post Proceso de Datos:

- Análisis de datos: Procesamiento de datos del ensayo usando Matlab y una hoja de cálculos hecha por el Dr. Wood en donde se definen parámetros para el ensayo.
- Inversión Manual: Se usa el Software “WINSASW” para realizar una inversión manual de prueba y error que es, en esencia, una búsqueda de aproximaciones a la inversión de la curva de dispersión experimental. Con este método, los parámetros del modelo son ajustados consecutivas veces para obtener una curva de dispersión teórica que se parezca lo más posible a la experimental.
- Inversión con Algoritmos: “Dinver” es un software para la inversión de curvas superficiales, usa algoritmos para calcular un perfil de VS y proporciona el “*Misfit*” el cual es un relativo a la aproximación que consigue el algoritmo “DINVER”.

Luego se hace la inversión de los datos con la cual se calcula la velocidad de onda de corte (V_s) contra la variación de profundidad, que se resume como un gráfico llamado perfil V_s de una dimensión.

Dicho ensayo se realizó 3 veces en terrenos diferentes formando una línea de 11,5 metros de longitud, con los 24 geófonos separados cada medio metro. El ensayo MASW realizado consistió en realizar golpes con el combo de 20 lb. a 2, 4 y 8 metros de distancia con respecto al primer geófono; para generar pequeñas ondas sísmicas que son captadas por los geófonos. Esta configuración es buena para caracterizar los estratos hasta los primeros 6 metros de profundidad (la mitad de la línea de geófonos).

2. Antecedentes.

2.1. Aerovía.

Sobre el proyecto “AEROVÍA”, la presa resume su concepto de la siguiente forma: Hoy en día, la red de transporte de Guayaquil está compuesta por Metrovía y sus rutas alimentadoras que cubren el Sur y el Oeste de la ciudad. Por el Norte, la troncal hacia Bastión Popular es la única existente y dos troncales adicionales están dentro de la planificación municipal. Sin embargo, teniendo en cuenta los recientes desarrollos del área urbana norte de Guayaquil y el incremento de la demanda de transporte entre Guayaquil y los cantones vecinos de Samborondón y Durán, aparecen como necesarios otros servicios de transporte colectivo, alternativos y complementarios a los servicios de Metrovía. En este contexto, se ha decidido llevar adelante la concepción de un transporte aéreo suspendido, denominado de ahora en más Proyecto de Aerovía, entre las ciudades de Guayaquil (el centro de la ciudad) y Durán. El municipio de Duran presenta importantes densidades poblacionales y una relación directa con la ciudad de Guayaquil. El trayecto previsto posee una extensión de 4100 metros con un tiempo de recorrido alrededor de 15 minutos y comprende 4 estaciones de pasajeros: Durán – Malecón 2000 – Julián Coronel – Parque Centenario. También comprende una estación técnica entre la estación Julián Coronel y la estación Malecón 2000, por las laderas del cerro del Carmen. Esa estación permite un cambio de dirección en el alineamiento. El alineamiento del sistema comienza en Duran, en la prolongación del Malecón ubicado al sur de dicha ciudad, tal como se muestra en la imagen satelital. En Duran, se prevé una estación de pasajeros con un parqueadero integrado de una capacidad de 250 plazas. También se prevé alimentar esa estación con servicios de buses dedicados, cuya inversión operación y mantenimiento será a cargo del Aliado Estratégico. Luego, se atraviesa el río Guayas hasta la estación de pasajeros Malecón 2000. Esta se ubica al este de la ciudad de Guayaquil y frente al río Guayas, cerca del centro cultural Libertador Simón Bolívar, en una gran área de atracción. La tercera estación de pasajeros, denominada Julián Coronel, se ubica en el cruce de la avenida de nombre homónimo y la avenida Quito. Por último, la

estación terminal Parque Centenario, se ubica justo al Norte del cruce entre la avenida 9 de octubre y la avenida Quito. Esa estación se concibe tal como una estación en pórtico por arriba de la Avenida Quito. (Ecuadoriano, 2018, pág. 1)

En la figura 1 se muestra el trazado sobre el mapa de la zona.



Figura 1. Trazado General del alineamiento del Proyecto de Aerovía. Tramo: Durán - Malecón 2000 - Estación Técnica - Julián Coronel - Parque Centenario.

2.1.1. Consideraciones Estación 5.

Los ensayos se realizaron en el cantón Durán donde estará ubicada la estación 5 de la Aerovía (ver Figura 2). El terreno en el que se está construyendo la estación tiene aproximadamente 1,2 hectáreas y estaba constituido mayormente por material arcilloso y limoso el cual fue rellenado en gran parte con material de

préstamo importado, una mezcla de ripio con cascajo de manera que la capacidad portante aumentara y se pudiera hacer uso del terreno.



Figura 2. Ubicación de la Estación 5

2.2. Ensayo MASW.

El Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), es un método no destructivo, que se usa para evaluar la velocidad de onda de corte (V_s), vinculado al módulo de corte (G). Este método analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores. (Studies, 2019)

Los registros se realizan con 12 o más geófonos en distancias cortas y largas desde una fuente impulsiva o vibratoria, que proporcionan una redundancia estadística para medir las velocidades de fase. Los datos multicanal permiten la identificación y rechazo de los modos no fundamentales de ondas Rayleigh, permiten también un proceso más efectivo para la eliminación del ruido y un proceso de recolección de datos más rápido. (Studies, 2019)

2.3. Herramientas para MASW.

Entre las herramientas necesarias para realizar un correcto MASW (Análisis Multicanal de Onda Sísmica) están las físicas y las virtuales. Las principales

físicas están la fuente, el cual es un martillo y un plato, los geófonos que son los que reciben la onda, y un sistema de recepción de datos que es el geófono y la computadora. Luego tenemos como secundarios, la cinta métrica, el plato en donde golpea el martillo, la batería y los cables que llevan la información.



Figura 4. Sismógrafo, Geode y batería.



Figura 3. Arreglo de Cables.



Figura 5. Geófono con punta.



Figura 6. Martillo de 8kg y plato de impacto.

2.3.1. Procesamiento de datos.

Seismodule Controller, es donde se ingresan parámetros como el intervalo de geófonos, posición del golpe, opciones de guardado, intervalo de guardado, etc. En la figura 7 se observa el *Software* donde se ingresan los datos, debajo se observa la posición en donde está la computadora y todos los parámetros anteriormente mencionados.

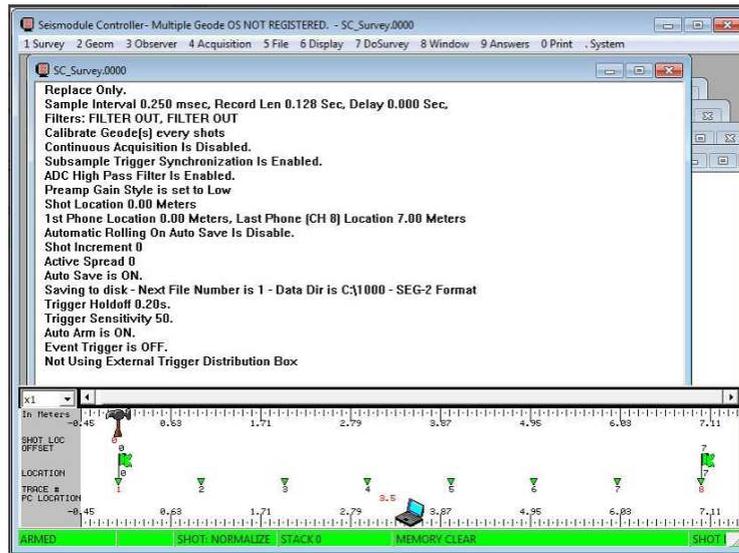


Figura 7. Interfaz de SEISMODULE CONTROLLER.

2.3.2. Proceso de datos.

Para procesar los datos obtenidos se usó el Programa Matlab con los complementos realizados por el Dr. Wood para analizar datos de ensayos MASW. Se inicia abriendo el archivo "*UofA_MASWMultiProcess*", el cual se usa para el procesamiento de MASW de fuente activa. En la figura 8 se observa la hoja de cálculo en donde se ingresan los parámetros referentes al ensayo.

```

files=[2;3;4;5];           %Enter the files to be processed
offset=[5;10;20;40];      %Enter source offset
Filetype=4;               %Enter file type to be analyzed (1 for Spectrum and
                          % 2 for transfer functions, 3 for average time records
                          % 4 for seg files from geode, 5 for seg files with
                          % individual averages, 6 is dual Spectrum from Vibroseis (1,2;3,4;5,6))
Shaker=0;                 %Enter 1 if shaker and Quattro were used with Geode

spacing=2;                %Enter the spacing between geophones
numk=4000;                % Number of trial wavenumbers
numf=16000;               %Number of frequency domain points
numcon=5;                 %Number of contour lines for 3-D plots
timelength=1;             %Enter the signal length in seconds
max_velocity=2000;        % Enter the maximum velocity plotted on the dispersion curve
max_frequency=50;         % Enter the maximum frequency plotted on the 3-D f-k spectra and dispersion curve
max_wavelength=300;       % Enter the maximum wavelength plotted on the 2-D Dispersion curve
numchannels=24;

Plot_flag=0;              %Controls Plotting of Spatiospectral correlation matrix (Yes=1 No=0)
Plot_flag3D=0;            % Controls 3-D plotting of wavenumber
Plot_flag3Dfr=1;          % Controls plotting of 3-D Frequency figure
Plot_flag3Dwave=0;        % Controls plotting of 3-D wavelength figure
Plot_flag3Dwf=0;

```

Figura 8. Hoja de cálculo en Matlab desarrollada por el Dr. Wood en donde se ingresan los parámetros referentes al ensayo.

Pasos a seguir para el procesamiento:

- a. Se ingresa el número de archivos que se quieren correr.
- b. Se ingresa la distancia desde la fuente, normalmente se hacen a 3 distancias diferentes.
- c. Poner 4 para el tipo de archivo, para este caso en particular se usó el Geode.

```

Filetype=4;               %Enter file type to be analyzed (1 for Spectrum and
                          % 2 for transfer functions, 3 for average time records
                          % 4 for seg files from geode, 5 for seg files with
                          % individual averages)

```

Figura 9. Selección de tipo de archivo a analizar.

- d. Ingresar 0 en el “shaker”, puesto que es una fuente vibratoria, y en esta tesis se usó una fuente de impacto (martillo).
- e. Ingresar la distancia entre los geófonos en la variable “spacing”.
- f. Ingresar el tiempo en segundos que se usará para procesar “timelength”, normalmente entre 1 o 2 segundos.

- g. Ingresar la máxima velocidad que se quiere graficar en la curva de dispersión, “*max_velocity*”, usualmente se usa 1000 m/s para la máxima velocidad.
- h. Ingresar la máxima frecuencia que se quiere en el grafico 3-D f-k del espectro y la curva de dispersión, “*max_frequency*”, los valores están entre 50 y 125.
- i. Ingresar la máxima longitud de onda que se quiere en el grafico en 3-D f-k del espectro y la curva de dispersión, “*max_wavelength*”, se usa comúnmente 300.
- j. Ingresar el número de geófonos que se usaron en el ensayo, en nuestro caso 24.

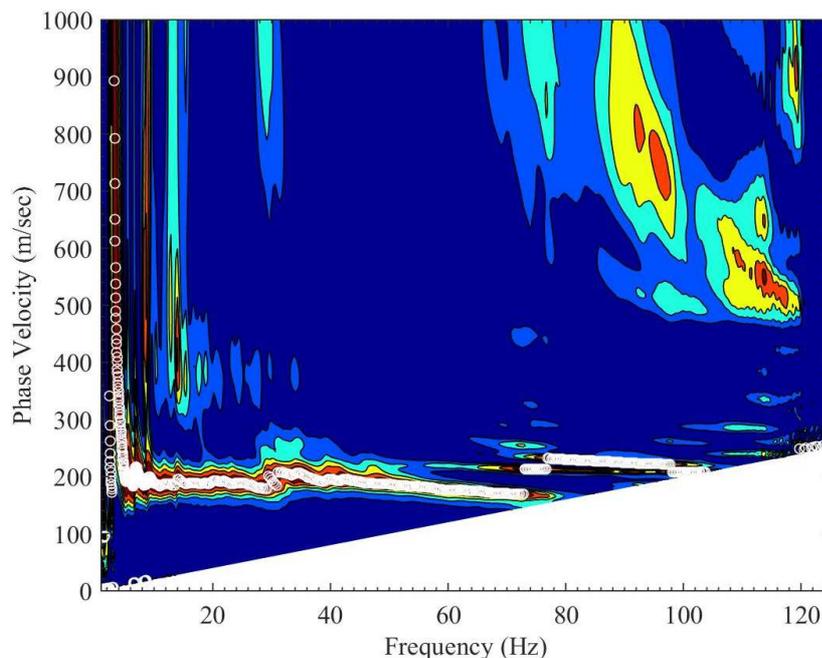


Figura 10. Curva de Dispersión, Velocidad vs Frecuencia.

En la figura 10 generada en Matlab luego del procesamiento previamente explicado, se obtiene información importante para la determinación del modo fundamental de la curva de dispersión.

2.3.3. Limpieza de los puntos.

La segunda parte del trabajo en Matlab radica en cortar todos los puntos que están relacionados a modos mayores o menores que no queremos incluir en

nuestra curva de dispersión final. Para esto se usa el archivo “PlotAndCutPoints_2” que se muestra en las figuras 12 y 13.

```

elimData=1;           %Enter 1 for data removal, 0 for viewing only
wavelength=0;        %Enter 1 to bin and plot in terms of wavelength 0 for Frequency.
log=1;               %Enter 1 to bin in terms of a log distribution 0 for linear.
saveResults=1;       %Enter 1 to save the results, otherwise enter 0
saveTextFile=1;      %Enter 1 to create a text file, otherwise enter 0

%% Plot Options (You may need to adjust these)
setLeg={'Hammer 5m';'Hammer 10m';'Hammer 20m'}; %Legend entries

min_velocity=0;      % Enter the minimum velocity plotted on the dispersion curve
max_velocity=1200;   % Enter the maximum velocity plotted on the dispersion curve

min_frequency=1;     % Enter the minimum frequency plotted on the 3-D f-k spectra and dispersion curve
max_frequency=100;   % Enter the maximum frequency plotted on the 3-D f-k spectra and dispersion curve

min_wavelength=1;   % Enter the minimum wavelength plotted on the 3-D Dispersion curve
max_wavelength=400; % Enter the maximum wavelength plotted on the 3-D Dispersion curve

%% Binning parameters (You most likely won't need to adjust these)
MaxP=100;           %Max frequency or wavelength
MinP=1;             %Min frequency or wavelength
numbins=50;         %Number of bins

```

Figura 11. Hoja de Cálculo donde se ingresan los parámetros de velocidades, frecuencias y longitudes de ondas.

Al igual que en el procedimiento anterior, se le ingresan los valores requeridos:

- a. Ingresar la mínima velocidad que se quiere graficar en la curva de dispersión, “*min_velocity*”, se pone 0.
- b. Ingresar la máxima velocidad de fase que se quiere graficar en la curva de dispersión, “*max_velocity*” se usó 1200.
- c. Ingresar la mínima frecuencia que se quiere graficar en la curva de dispersión, “*min_frecuency*”, se pone 1.
- d. Ingresar la máxima frecuencia que se quiere graficar en la curva de dispersión, “*max_frecuency*”, con valores entre 50 y 125.
- e. Ingresar la mínima longitud de onda que se quiere graficar en la curva de dispersión, “*min_wavelength*”, se usa 1.
- f. Ingresar la máxima longitud de onda que se quiere en el graficar en la curva de dispersión, “*max_wavelength*”, se pone 400.

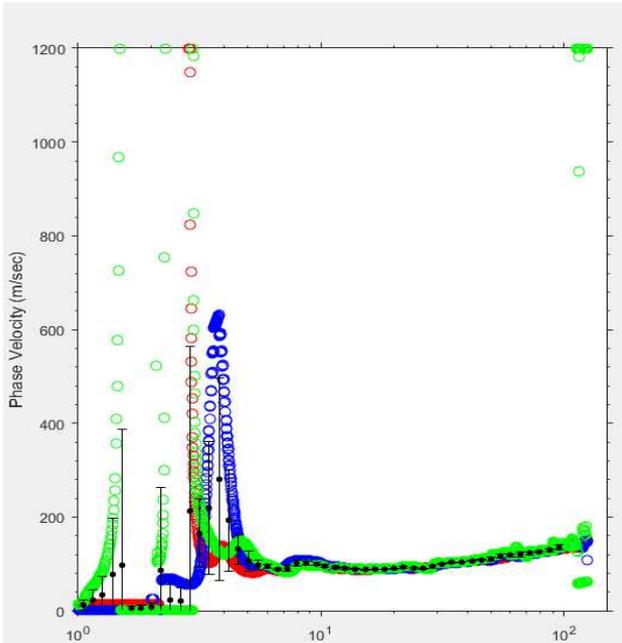


Figura 12. Gráfico luego de la corrida.

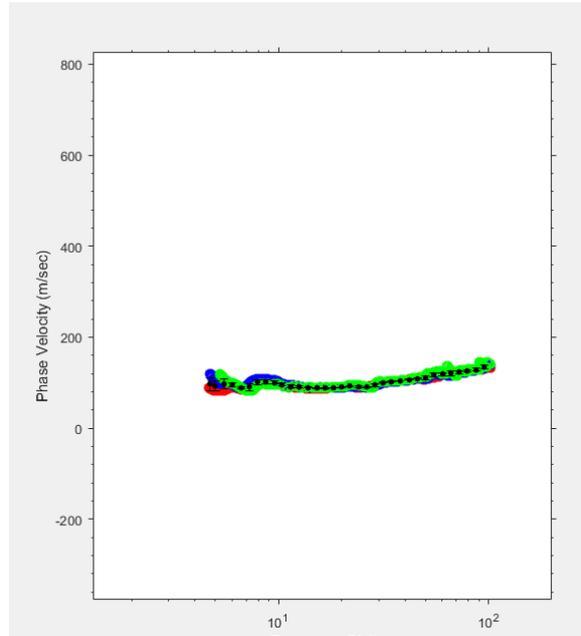


Figura 13. Gráfico luego de limpieza

Como se observa en la figura 12 y 13, se recorta y se limpia de modo que los puntos queden en una línea un poco ascendente, y así se asimile al modo fundamental.

2.3.4. Algoritmo DINVER.

Luego de tener este archivo se ingresa a DINVER el cual es un software para inversión de ondas superficiales. En este programa se vuelve a editar la curva de manera que se eliminen picos (puntos alejados del patrón) y se le dan parámetros.

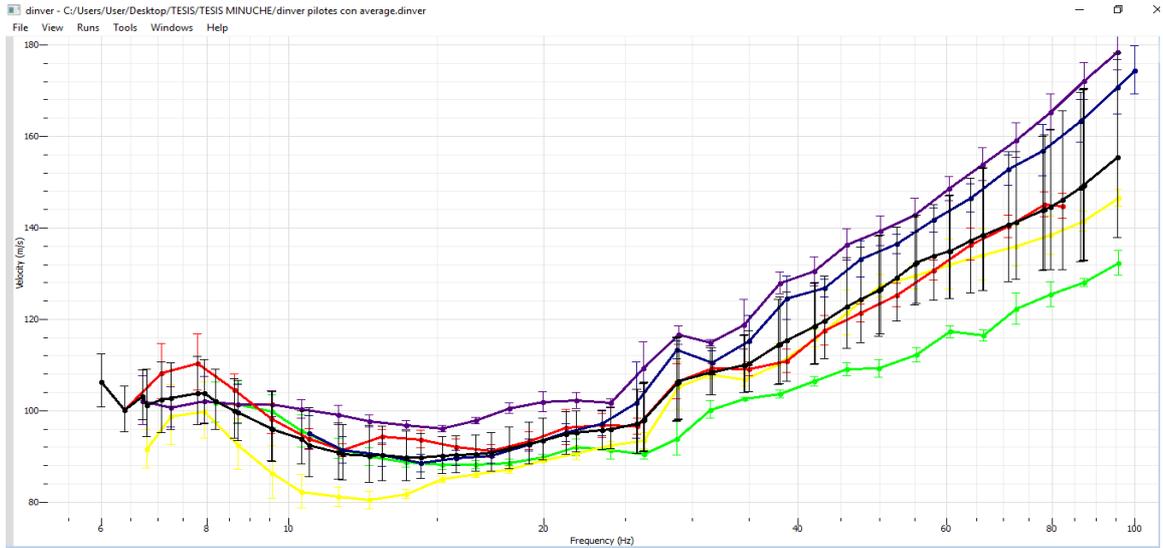


Figura 14. Curvas de velocidad vs frecuencia del suelo.

En la figura 14 se puede observar cómo quedan las curvas luego de realizar un proceso de edición. Estas curvas dan una noción de resultados obtenidos e inclusive se pueden usar para interpretar la velocidad de onda.

2.3.5. Proceso de inversión.

Una vez que tenemos la curva de DINVER, se la abre en MATLAB y con ayuda de los complementos para ensayos MASW del Dr. Wood, ingresamos el nombre del archivo y la línea en donde comienzan los *headlines*, luego se corre el programa y se obtiene un archivo “.EXD”.

Con el fin de poder realizar la inversión, se utilizó WINSASW, el cual es un software para la interpretación de datos, determinación de velocidades y modelamiento. Este programa usa el método de prueba y error que es esencialmente aproximaciones manuales a la inversión de la curva experimental de dispersión. En estos métodos, los parámetros del modelo son satisfactoriamente ajustados con el fin de obtener una curva teórica de dispersión que se asemeje lo más posible a la información proporcionada por la experimental. Su implementación requiere la disponibilidad de un algoritmo para la solución de modelamientos directos. En la práctica, un número limitado de modelamientos directos son hechos con los parámetros del modelo ajustados a cada momento con el fin de llegar a un resultado con la menor cantidad de error

entre la curva de dispersión numérica y la experimental. El procedimiento es bastante subjetivo y requiere un cierto grado de experiencia con el fin de alcanzar un resultado aceptable en un tiempo no tan extenso.

Muchas veces los procedimientos de prueba y error representan la única vía posible en la inversión de una curva de dispersión. En estas situaciones, los algoritmos matemáticos, como los usados por DINVER pueden, en ocasiones, quedar atascados y fallar debido a inconsistencias en el cálculo necesario para realizar la inversión, particularmente si no se puede hacer la operación analíticamente, se intenta usar un método discreto.

El procedimiento en WINSASW requiere tener una curva teórica y una de dispersión. La curva de dispersión es la que se obtuvo de Matlab, cuando se abre el archivo aparecen varios puntos que forman una curvilínea. Se tantean valores a ciertos parámetros como profundidad, VS, VP, coeficiente de poisson de manera que la curva experimental o teórica vaya asemejándose a la de dispersión. Una vez que están casi sobrepuestas, se utilizan dichos valores en DINVER, y se procede a correr el programa.

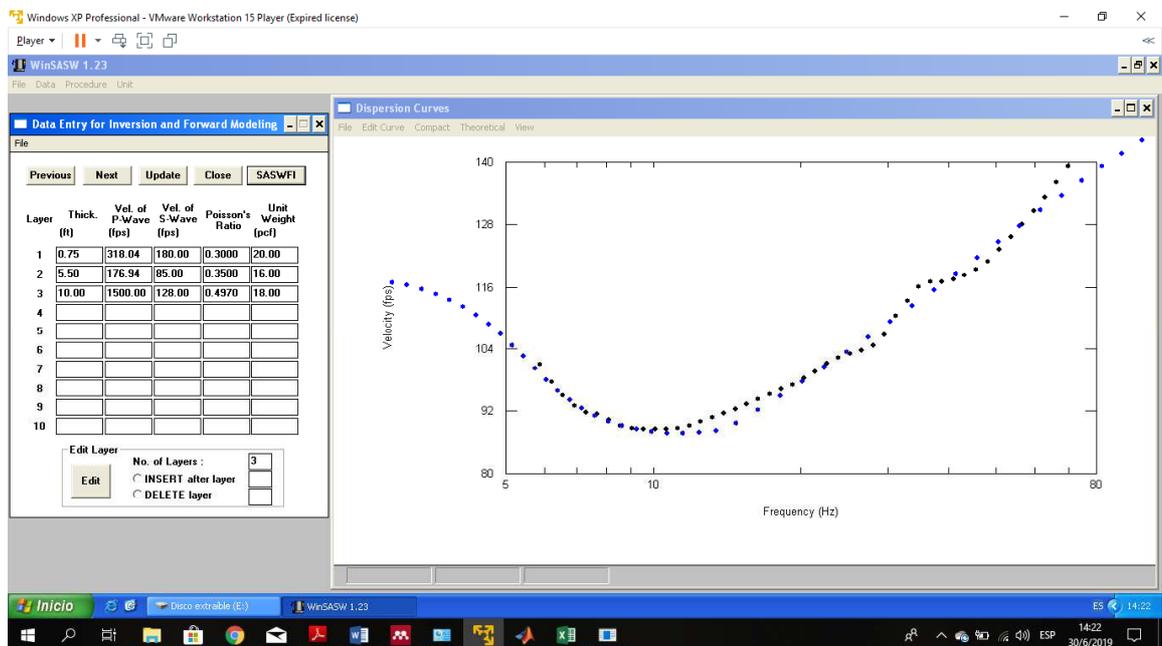


Figura 15. Programa WINSASW donde se muestra la tabla de parámetros y la curva de dispersión.

3. Marco Teórico.

3.1. Métodos Geofísicos para la exploración de suelo en la Ingeniería.

- Trabajo Pionero

El uso de las ondas superficiales data desde 1950 cuando los métodos de estado estacionario fueron usados por primera vez por Van der Pol (1951) y Jones (1955). En ese tiempo, estaba basado en el modo fundamental (M0)- únicamente la teoría de las ondas Rayleigh y todos los otros tipos de ondas- modos altos, ondas P, etc.- que fueron ignorados. Este método evolucionó luego para ser conocido comúnmente como ondas superficiales continuas o método CSW. Hasta tanto, la teoría de la inversión de suelo del sitio fue mejorada por Tokimatsu et al.(1991). Desde los comienzos de la aplicación de las ondas superficiales, los pavimentos probaron que eran más complejos que el suelo, con un tipo especial de onda guiada llamada “*leaky waves*” que requerían un acercamiento más complejo al dominio al momento de resolver ecuaciones de onda. La utilización de computadoras, permitió un alcance mayor por Martincel (1994) pero igual había limitación en los resultados.

- Estudio de dos receptores (Método SASW)

En los años ochenta, el método de los dos receptores fue introducido por investigadores de la universidad de Austin, Texas, se basó en el análisis de fase espectral de la transformada rápida de Fourier creando ondas sísmicas por una fuente activa como un martillo. A partir de esto fue ampliamente usada por ingenieros geotécnicos e investigadores. Este método fue llamado Análisis Espectral de Ondas Superficiales. El modo fundamental (M0) de las ondas Rayleigh fue usado en las etapas tempranas. La generación de multi-frecuencias simultaneas producto del impacto de la fuente y luego la separación por la transformada rápida de Fourier durante la etapa del procesamiento de los datos hubo una mejora general en la eficiencia del método en comparación con métodos anteriores tales como ondas superficiales continuas o (CSW por sus siglas en ingles).

El proceso general del SASW es el siguiente:

- Arreglo en campo a diferentes separaciones
- Procesamiento de datos para encontrar la velocidad de fase (Vph):
 $V_{ph} = 2 \cdot \pi \cdot f / \Delta \phi$ ($\Delta \phi$ = diferencia de fase, f =frecuencia, $\pi=3.14159265$)
- Criterio de filtración de la longitud de onda, curva de dispersión compacta
- Transparencia sónica o *Crosshole Seismic* (CS)

Las investigaciones sobre el método *crosshole* tienen el fin de proveer información sobre las propiedades de suelos dinámicos y rocas para el análisis y diseño sísmico de estructuras, además de estudiar el potencial de licuación y el diseño para la cimentación. El estudio compara la profundidad de las ondas de corte y compresión con la velocidad de los perfiles. Otros parámetros tales como el módulo de Poisson y de Young pueden ser determinados fácilmente mediante las velocidades de onda de compresión y de corte. El *Crosshole* es un método profundo para la determinación de las propiedades del suelo y la roca. Una fuente capaz de generar ondas de corte y compresión es descendida en una de las perforaciones y un par de receptores de geófonos son descendidos a la misma profundidad en otras dos perforaciones puestos a distancias medidas en una línea. Los receptores son puestos a presión contra el suelo de la perforación con el fin de que detecte el paso de las ondas P y S. (Olson, 2003)

- *Downhole Seismic* (DS)

Las prospecciones son similares a las del *Crosshole* aunque esta solo requiere una perforación para proporcionar los perfiles de onda de corte y compresión. Este método usa una tabla como fuente en la superficie para generar ondas P y S. Tres pares de geófonos idénticos son descendidos en la perforación con un espaciamiento de 5 a 10 pies para colectar la energía de las ondas P y S. (Olson, 2003)

- Sísmica de Refracción

El método sísmico de refracción se desarrolló en la década de los 50's y fue muy empleado en la industria petrolera antes de las innovaciones tecnológicas alcanzadas por los métodos de reflexión. Sin embargo, este método tiene grandes ventajas de aplicación, en sitios donde las discontinuidades o cambios de formación están muy próximos a la superficie. La propiedad física a medir en los métodos sísmicos es la velocidad de propagación de las ondas que viajan a través del suelo. La profundidad y resolución de esta técnica está en función del número de geófonos empleados, y su separación, de los puntos de tiro y la fuente sísmica empleada para el levantamiento. Empleando los resultados de una serie de perfiles en un sitio con diferencia topográfica, es posible construir modelos 3D con base en las velocidades de onda P (V_p). (GEOTEM, 2019)

- Micro trepidaciones en Arreglo Multicanal (MAM)

El método MAM o Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanal es un método pasivo de exploración geofísica basado en el análisis de las vibraciones ambientales, es decir utiliza como fuente el ruido ambiental, en arreglos predeterminados y mediante el análisis de dispersión de éstas, determinar el perfil de velocidades de ondas S. Para ello, este método analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie a los receptores. (GEORYS INGENIEROS, 2016, pág. 1)

No se requiere la utilización de una fuente externa de energía, como en los ensayos de Refracción Sísmica y MASW. Se utiliza un arreglo instrumental bidimensional sobre la superficie. La combinación de los métodos MASW y MAM, permiten obtener perfiles de velocidades de ondas S (V_s) hasta profundidades promedio de evaluación entre 50 m a 80 m. Este método permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman, obteniéndose el perfil de velocidad de onda de corte (V_s) para el punto central de dicha línea. Las ondas superficiales de longitud de onda más corta reflejan la

velocidad de la onda de corte (V_s) superficial y las más largas reflejan la velocidad de la onda de corte (V_s) más profunda. El perfil de la onda de corte (V_s) puede calcular midiendo la velocidad de fase para diferente longitud de onda (frecuencia). (GEORYS INGENIEROS, 2016, pág. 1)

- REMI

La refracción de micro temores o (REMI) por su abreviación en inglés (*Refraction Microtremor*), es un método que provee una forma eficiente y efectiva para obtener información general sobre grandes volúmenes subterráneos en una dimensión. En este caso, el arreglo debe ser apropiado dependiendo de la profundidad de exploración deseada. Con REMI se puede obtener perfiles verticales de ondas S a profundidades de hasta 100 metros para la caracterización sísmica del sitio. Las bases teóricas del método son las mismas que las del SASW y del MASW. Lo que diferencia al REMI es que la información de campo puede ser recolectada usando modernos y pequeños aparatos de exploración sísmica. Su interpretación y el análisis es hecho usando softwares disponibles para computadoras tanto de escritorios como portátiles. Para la caracterización sísmica del sitio, es apropiado usar un geófono de baja frecuencia y un arreglo extenso de geófonos (Rucker, 2003).

- MASW (Análisis multicanal de ondas superficiales)

El ensayo MASW o Análisis de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal es un método que consiste en la interpretación de las ondas superficiales (Ondas Rayleigh) de un registro en arreglo multicanal, generadas por una fuente de energía impulsiva en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno, obteniéndose el perfil de velocidades de ondas de corte (V_s) para el punto central de dicha línea. El método MASW, permite obtener perfiles de ondas S hasta profundidades promedio de 25 m a 30 m. (Rivera, Piedra, & Paripanca, 2016, pág. 51)

3.2. Métodos basados en ondas superficiales para estimar el perfil de Vs.

De acuerdo con el origen de las ondas superficiales, los métodos basados en ondas superficiales pueden clasificarse en métodos activos y métodos pasivos. En los métodos activos, las ondas superficiales registradas son provocadas por una fuente dinámica controlada que genera una perturbación en superficie y registradas por geófonos alineados con la fuente. Esta perturbación puede ser generada con un mazo o martillo, dejando caer un peso al terreno o utilizando mecanismos más sofisticados que permitan un mayor control sobre las perturbaciones generadas, y, por ende, sobre el rango de frecuencias y amplitud de las ondas. (Guarachi, Sáez, & Flórez, 2015, pág. 13)

Por su parte, los métodos pasivos se basan en la medición de vibraciones ambientales. Las vibraciones con una frecuencia superior a 1 Hz tienen su origen en la actividad humana (tráfico, maquinaria, etc.) y se conocen como micro temblores. Por otro lado, las vibraciones de menor frecuencia están asociadas a fuentes naturales, tales como el oleaje, ciclones o corrientes de viento. y son conocidas como microsismos. El supuesto fundamental de los métodos pasivos es considerar las vibraciones ambientales como una superposición de ondas superficiales que se propagan con una distribución aleatoria uniformemente distribuida en todas las direcciones. (Guarachi et al., 2015, pág. 13)

3.3. Recolección de datos.

Idealmente, la señal a medir es únicamente el resultado de ondas superficiales, sin ruido, siendo esta, toda la banda de frecuencia de interés. Lo que sucede en realidad es que la fuente genera ondas superficiales sobre una banda de interés limitada y su vez otro tipo de ondas son generadas. Más que esto, los registros son afectados por ruido y por las limitaciones de la recolección. Los receptores responden sin distorsión solo por un rango limitado de frecuencias, y el dispositivo de recolección digitaliza rastros, con muestreo finito limitado. Los datos recolectados también son afectados por el espectro limitado de la fuente, la respuesta del receptor, y otras distorsiones relacionadas al efecto de campo cercano y a posibles vibraciones laterales.

3.4. Determinación de la curva de dispersión.

La distribución de velocidades de fase en función de la frecuencia o longitud de onda se denomina curva de dispersión. Los ingenieros se han vuelto cada vez más dependientes de la geofísica para determinar las velocidades de las ondas de corte, que son necesarias para evaluar la respuesta del sitio bajo carga sísmica. Los métodos de onda de superficie no invasivos, como SASW, MASW, Refraction Microtremor y MAM, están ganando popularidad y aceptación en la comunidad de ingeniería por proporcionar perfiles de velocidad de onda de corte (V_s), los métodos de superficie utilizan la propiedad de dispersión de las ondas de superficie para determinar V_s a varias profundidades muestreadas. (QUEVEDO, 2018)

Con el fin de obtener V_s sobre el rango de profundidad generalmente desde la superficie del suelo hasta la roca base, la dispersión debe ser aparente en un rango correspondiente de frecuencias de ondas superficiales. (QUEVEDO, 2018)

Los métodos de onda de superficie que dependen únicamente de energía de fuente pasiva (por ejemplo, Microtremor de refracción y MAM) pueden no incluir un rango suficiente de frecuencias para resolver velocidades dentro de la porción superior de la columna de suelo, que a menudo es la más crítica para la respuesta del sitio. Para proporcionar el rango de frecuencia más amplio, se debe utilizar una curva de dispersión compuesta a partir de resultados de fuente activa y pasiva. Existen distintos enfoques para poder determinar las características dispersivas de un sitio, estos varían dependiendo el tipo de ensayo y del número de sensores utilizados. (QUEVEDO, 2018)

Estos enfoques varían en función del tipo de fuente (activa o pasiva) y el número de receptores utilizados. Por ejemplo, el Análisis Espectral de Ondas Superficiales o SASW, permite el análisis de ensayos realizados con una fuente activa alineada con dos receptores. La ejecución de ensayos con múltiples receptores permite reducir el número de golpes y mediciones que se deben realizar en los ensayos activos, optimizando los tiempos de trabajo. Además,

permiten diferenciar las ondas Rayleigh de otros tipos de ondas sísmicas que viajan en superficie. (Guarachi et al., 2015, pág. 13)

La geofísica junto con sus ensayos hace una combinación de análisis de los datos receptados en los sensores. Esto, debido a la conversión del dominio de los datos de espacio y tiempo a un registro diferente que ayude a identificar valores prometedores y a su vez, se obtenga los resultados de las propiedades del suelo. (Guarachi et al., 2015, pág. 14)

Entre los ensayos más utilizados se encuentran: el análisis en el dominio de la frecuencia y lentitud o τ -p (McMechan y Yedlin, 1981), el análisis frecuencia-número de onda o f-k (Lacoss et al. 1969) y la transformada propuesta por (Park, Miller, & Xia, 1999), conocida comúnmente como MASW. (Guarachi et al., 2015)

3.5. Estimación del perfil de Vs (Inversión).

Para la caracterización dinámica del suelo, una de las propiedades más importantes es la resistencia al esfuerzo cortante, la cual está evaluada en términos del módulo dinámico de rigidez. Debido a la importancia de esta propiedad en la caracterización del suelo se desarrollaron variedad de métodos destinados a medir el módulo dinámico de rigidez. Entre los métodos más conocidos están los de laboratorio (Triaxial cíclico, Columna Resonante RC), los in-situ (*Down Hole*, *Cross Hole*, Prueba de Penetración del Cono Sísmico SCPT) y los empíricos (Prueba de Penetración Estándar SPT, Prueba de Penetración del Cono CPT). Los primeros hacen una medición directa del módulo, los segundos lo hacen indirectamente a través de la medición de la velocidad de onda de corte y los empíricos a través de relaciones producto de la experiencia. (Nalvarte & Oyarce, 2018, pág. 31)

El método de la sísmica de dispersión de ondas superficiales se perfila como una buena alternativa a las desventajas de los métodos tradicionales ya que se aplica directamente en el sitio de estudio y no requiere la realización de perforaciones. El fundamento teórico del método está en la propiedad dispersiva de las ondas Rayleigh, esto es, cada componente frecuencial de la onda viaja a una velocidad diferente (velocidad de fase) que depende de las propiedades del suelo

principalmente de la rigidez. A partir del método de dispersión sísmica de ondas superficiales se puede conocer un modelo estructural del subsuelo. El procedimiento utilizado es denominado de inversión, ya que, en base a las mediciones obtenidas mediante ensayos geofísicos activos y pasivos, regresaremos a la obtención de los parámetros dinámicos que la generaron. (Nalvarte & Oyarce, 2018, pág. 31)

Con el fin de reducir estas dificultades, en los últimos años, se han desarrollado métodos para tratar los casos no lineales sin necesidad de linealizarlas. Estos métodos se basan en el muestro pseudo-aleatorio de las propiedades dinámicas del suelo dentro de ciertos rangos, los cuales son definidos por el usuario en donde se cree que se puede encontrar la solución. (Nalvarte & Oyarce, 2018, pág. 32)

3.6. Fuente activa (Ensayos MASW Activos).

Los ensayos MASW pueden dividirse en pasivos y activos. El ensayo activo fue introducido por primera vez en 1999, es el más común de los estudios y puede producir perfiles de Velocidad en 2D. A diferencia de los ensayos pasivos, los activos proporcionan una curva de dispersión en una frecuencia relativamente alta, pero con una longitud de onda corta, lo que los hace perfectos para ensayos entre 0-30 metros. Para este tipo de pruebas se usa una fuente sísmica activa, normalmente un martillo que golpea un plato y genera las ondas que son receptadas por los geófonos. En este trabajo se utilizó un combo de 8 kg en el cual se instaló el disparador, este es un sensor de impacto que informa al Seismic Controller que se ha producido un golpe y se almacenan los datos en la laptop.

Por otro lado, el ensayo pasivo se realiza únicamente con el ruido ambiental, el paso de vehículos, los cambios de presión en la atmosfera o maquinaria trabajando. Este, nos permite obtener información del suelo que está mucho más profundo debido a su baja frecuencia y su larga longitud de onda, algo que lo hace muy útil cuando se intenta determinar las características de una cimentación muy profunda.

3.7. Geófonos.

Estos elementos son fundamentales ya que son el primer elemento en la cadena de adquisición de datos. Se encargan de traducir el movimiento del suelo en una señal eléctrica medible que es luego transmitida, procesada y guardada por el aparato de adquisición (Foti, Lai, Rix, & Strobbia, 2014). Para este trabajo en particular se usaron 24 geófonos de 4,5 Hertz, puesto que es lo recomendable cuando se estudia un suelo blando. Es necesario tener el mayor cuidado al momento de ubicar estos elementos, puesto que cualquier interferencia, golpe o movimiento puede alterar la toma de muestra. En la pantalla de la computadora, luego de que todo está conectado, se puede verificar si algún geófono está tomando lecturas externas al ensayo, lo que permite corregir la posición o cambiar el plato por una punta que se incruste en el suelo.

3.8. Arreglos.

Para los ensayos MASW se debe usar arreglos lineales para los geófonos, la cantidad que se debe usar y el espaciamiento entre ellos depende del tamaño del área de estudio y la máxima profundidad que se desea explorar. Se recomienda un número mínimo de 12 geófonos para el MASW, por ejemplo, para este ensayo se usaron 24 con una distancia entre ellos de 0,5 metros.

Los geófonos deben ser colocados en superficies planas, en caso de haber pendiente o irregularidades en el terreno, se debe colocar la punta e insertarla lo más profundo posible de manera que solo sea visible la parte superior del geófono.

3.9. Transformada de Fourier.

La transformada de Fourier es ampliamente usada en el campo del análisis de las ondas superficiales, en sí es una transformación matemática que se emplea para transformar señales del dominio del tiempo y el de la frecuencia. Las dos variables representan dos dominios. La señal original depende del tiempo, y es representada como tiempo-dominio de la función. Su transformada depende de la frecuencia y es la representación dominio-frecuencia de la función. En teoría, la transformada es perfectamente invertible, sin que haya pérdida de

información cuando se transforma. La transformada se deriva de las series de Fourier, la cual es la descomposición de una señal periódica arbitraria en una suma de armónicas.

4. Ventajas de MASW.

- Es un ensayo relativamente rápido y no requiere mayor tiempo en obra.
- Los equipos son fáciles de transportar.
- No generan ninguna perturbación al suelo
- Se pueden hacer casi en cualquier terreno, ajustando ciertos parámetros.
- Permiten tener una idea bastante acertada sobre las propiedades del suelo.
- Pueden cubrir profundidades de hasta 30 metros sin necesidad de perforar.
- Son relativamente más baratos que una perforación.
- Permiten cubrir bastante área con arreglos largos.
- El arreglo es muy sencillo de hacer y no requiere de expertos.

5. Desventajas MASW.

- Los ruidos ambientales pueden ocasionar mediciones incorrectas.
- Dificultad para realizar los ensayos en horarios de trabajo.
- Hay capas pequeñas de material que no se divisan en el ensayo, las capas gruesas son más fáciles de detectar.
- El MASW activo llega a una profundidad máxima de 30 metros.
- La extensión del terreno debe ser suficiente para poder armar todo el arreglo.
- El terreno debe estar sin maleza puesto que el contacto entre esta y los geófonos podría ocasionar una medición errónea.
- La topografía del terreno debe ser regular, cotas muy dispares no permitirían realizar un buen ensayo.

6. Resultados.

6.1. Metodología MASW.

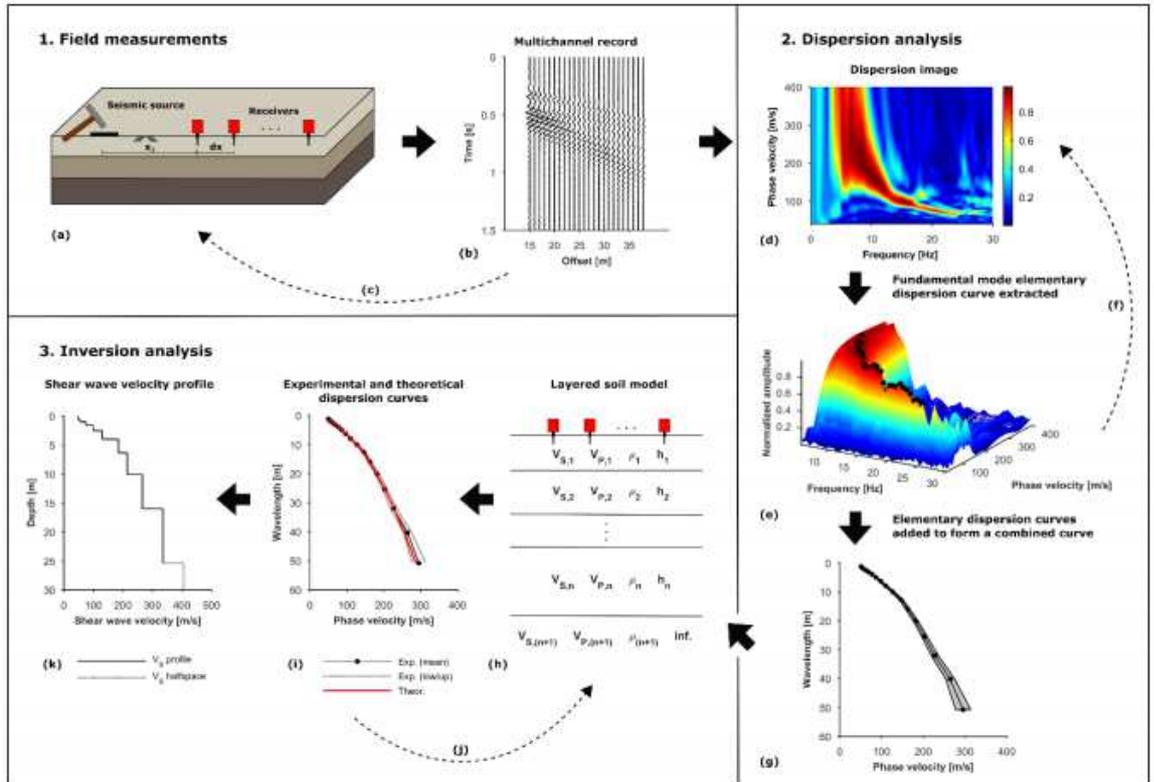


Figura 16. Diagrama de los procesos para realizar un ensayo MASW obtenida de la página www.MASW.com

Los ensayos se realizaron en 3 terrenos diferentes formando una línea de 11,5 metros de longitud, con los 24 geófonos separados cada medio metro. El ensayo MASW realizado consistió en realizar golpes con el combo de 8 kg. a 2, 4 y 8 metros de distancia con respecto al primer geófono; para generar pequeñas ondas sísmicas que son captadas por los geófonos. Esta configuración es buena para caracterizar los estratos hasta los primeros 6 metros de profundidad (la mitad de la línea de geófonos). Se realizaron 9 mediciones, 3 en cada tipo de terreno en la estación 5 de la Aerovía en Durán.

El objetivo central de este trabajo de tesis es medir el cambio de las propiedades del suelo luego de que se haga una cimentación, ya sea superficial (relleno) o profunda (pilotes), partiendo de la teoría de que luego de una perturbación en el terreno, el suelo se hará más o menos resistente.

Debido a que la obra ya estaba empezada cuando se inició este trabajo, se consideró que todo el suelo del terreno de la Estación 5 de la Aerovía era igual, tanto el terreno natural, el relleno y en el que se hincaron los pilotes. Si se hubiera podido hacer desde un principio, el primer ensayo hubiera sido en la zona donde se hincaron los pilotes y donde estará la estación, antes de cualquier cimentación, de manera que los resultados sean más consistentes y tengamos la certeza de que es el mismo terreno. Luego de la cimentación superficial (relleno con cascajo) se hubieran hecho nuevas mediciones y finalmente, después de hincados los pilotes.

6.2. Resultados de sondeos.

A continuación, se presentan las velocidades de onda a distintas profundidades y para cada caso:

6.2.1. Terreno Natural.

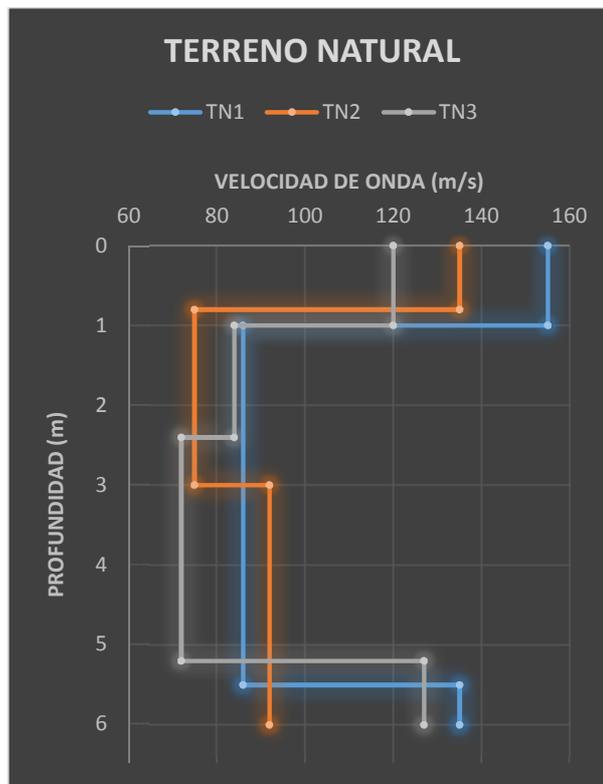


Figura 17. Gráfico de Vs de Terreno Natural.

6.2.1.1. Perfil 1.

Tabla 1. Profundidades y velocidades de onda del perfil #1 de Terreno Natural.

PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (m/s)
0,0	155
1,0	155
1,0	86
5,5	86
5,5	135
6,0	135

El perfil 1 está localizado en el terreno natural y es el ensayo más próximo al río, se puede observar que empieza con una velocidad de 155 m/s, la cual es relativamente alta, lo que se atribuye al uso como patio de contenedores, además del paso de la maquinaria. Luego del primer metro hay un descenso brusco a 86 m/s, el cual se mantiene hasta los 5,5 metros. De ahí en adelante aumenta a 135 m/s, siendo ya un estrato más resistente.

6.2.1.2. Perfil 2.

Tabla 2. Profundidades y velocidades de onda del perfil #2 de Terreno Natural.

PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (m/s)
0,0	135
0,8	135
0,8	75
3,0	75
3,0	92
6,0	92

El perfil 2 está a una separación de 5 metros sentido oeste-este del perfil 1, al inicio tiene una velocidad un poco alta, sin embargo, decrece bruscamente a una velocidad de 75 m/s a los 80 cm y a los 3 metros de profundidad aumenta un poco hasta 92 m/s, velocidad que mantiene hasta llegar a los 6 metros de profundidad. Esta parte no se mostró tan resistente como el otro.

6.2.1.3. Perfil 3.

Tabla 3. Profundidades y las velocidades de onda del perfil #3 de Terreno Natural.

PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (m/s)
0,0	120
1,0	120
1,0	84
2,4	84
2,4	72
5,2	72
5,2	127
6,0	127

El perfil 3 está a 10 metros del perfil 1 sentido oeste-este, empieza con una velocidad más o menos alta de 120 m/s hasta que al primer metro se disminuye hasta 84 m/s y continua así hasta los 2,4 metros en donde vuelve a disminuir a 72 m/s hasta llegar aproximadamente a los 5 metros, aquí la velocidad de la onda aumenta hasta 127 m/s, es decir, se encontró un estrato más resistente.

6.2.2. Terreno Rellenado.

A continuación, se presentan los gráficos de Velocidades de Onda de Terreno Rellenado:

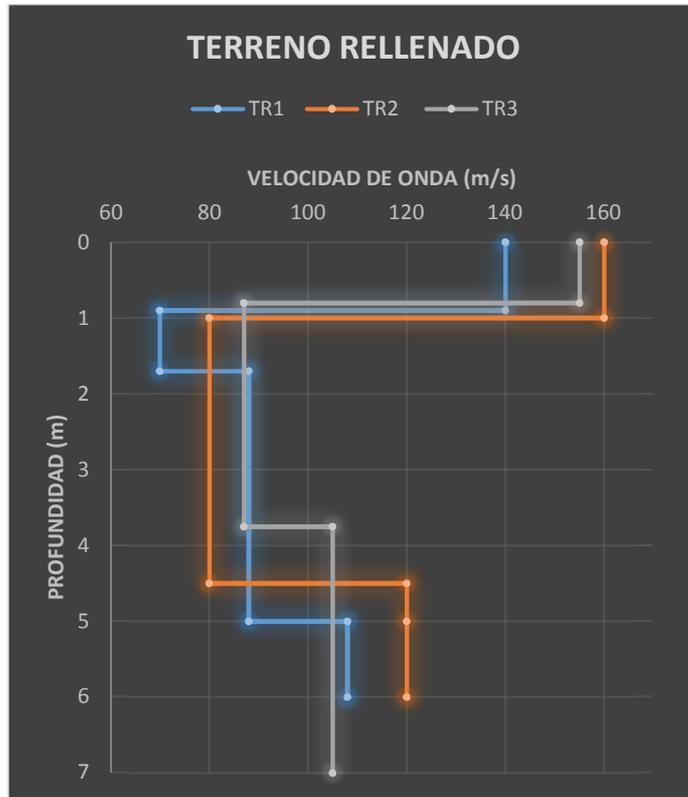


Figura 18. Gráfico de Vs de Terreno Rellenado.

6.2.2.1. Perfil 1.

Tabla 4. Profundidades y las velocidades de onda del perfil #1 del Terreno Rellenado.

PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (m/s)
0,0	140
0,9	140
0,9	70
1,7	70
1,7	88
5,0	88
5,0	108
6,0	108

El perfil 1 del terreno rellenado muestra una velocidad de 140 m/s en su primer metro, luego baja su velocidad a la mitad, 70 m/s hasta los 1,7 metros. Luego aumenta ligeramente hasta los 88 m/s llegando a los 5 metros en donde incrementa a 108 m/s. Se observa que en este perfil hubo más estratos y a medida que se profundizaba fue aumentando su Vs.

6.2.2.2. Perfil 2.

Tabla 5. Profundidades y las velocidades de onda del perfil #2 del Terreno Rellenado.

PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (m/s)
0,0	160
1,0	160
1,0	80
4,5	80
4,5	120
6,0	120

En el perfil 2 se empieza con una velocidad relativamente alta de 160 m/s hasta el primer metro, lo que corresponde al material de préstamo importado, luego hasta los 4,5 metros que es terreno del sitio, la velocidad decreció hasta la mitad, es decir, 80 m/s. El último registro que se tuvo fue hasta los 6 metros en donde se obtuvo un Vs de 120 m/s.

6.2.2.3. Perfil 3

Tabla 6. Profundidades y las velocidades de onda del perfil #3 del Terreno Rellenado.

PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (m/s)
0,0	155
0,8	155
0,8	87
3,75	87
3,75	105
6,0	105

El perfil 3 es muy parecido al perfil 2, debido al relleno, se empieza con una velocidad alta de 155 m/s la cual se mantiene hasta aproximadamente el primer metro, luego hasta los 3,75 metros la velocidad decrece mucho y llega a los 87 m/s. Por último, cuando sobrepasa los 3,75 metros hasta los 6 metros aumenta a 105 m/s.

6.2.3. Terreno con Relleno y Pilotes

A continuación, se presentan los gráficos de Velocidades de Onda de Terreno Rellenado:

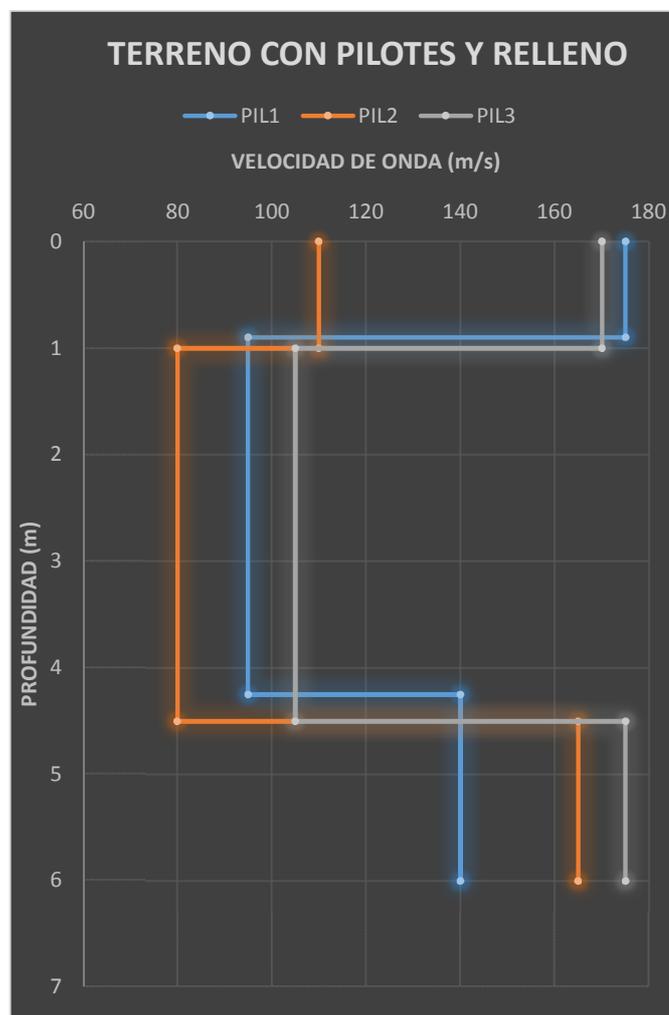


Figura 19. Gráfico de Vs de Terreno con Pilotes.

6.2.3.1. Perfil 1.

Tabla 7. Profundidades y velocidades de onda del perfil #1 del Terreno con Pilotes.

PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (m/s)
0	175
0,9	175
0,9	95
4,25	95
4,25	140
6,0	140

El perfil 1 inicia con una velocidad muy por encima de las velocidades obtenidas antes en estos ensayos sobre otros terrenos, 175m/s hasta el primer metro, luego desciende hasta los 4,25m a una velocidad de 95 m/s. Por último, incrementa su velocidad hasta los 140m/s hasta llegar a los 6 metros.

6.2.3.2. Perfil 2.

Tabla 8. Profundidades y las velocidades de onda del perfil #2 del Terreno con Pilotes.

PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (m/s)
0,0	110
1,0	110
1,0	80
4,5	80
4,5	165
6,0	165

El perfil 2 comienza con una velocidad baja de 110 m/s hasta el primer metro, luego hasta los 4,5 metros se reduce hasta 80 m/s, los últimos 1,5 metros vuelve a aumentar hasta 165 m/s.

6.2.3.3. Perfil 3.

Tabla 9. Profundidades y velocidades de onda del perfil #3 del Terreno con Pilotes.

PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (m/s)
0,0	170
1,0	170
1,0	105
4,5	105
4,5	175
6,0	175

El perfil 3 mantiene la tendencia del suelo con pilotes, en el primero metro una velocidad alta de 170 m/s y luego baja a 105 m/s. En los últimos 1,5 metros, el VS aumenta a 175 m/s.

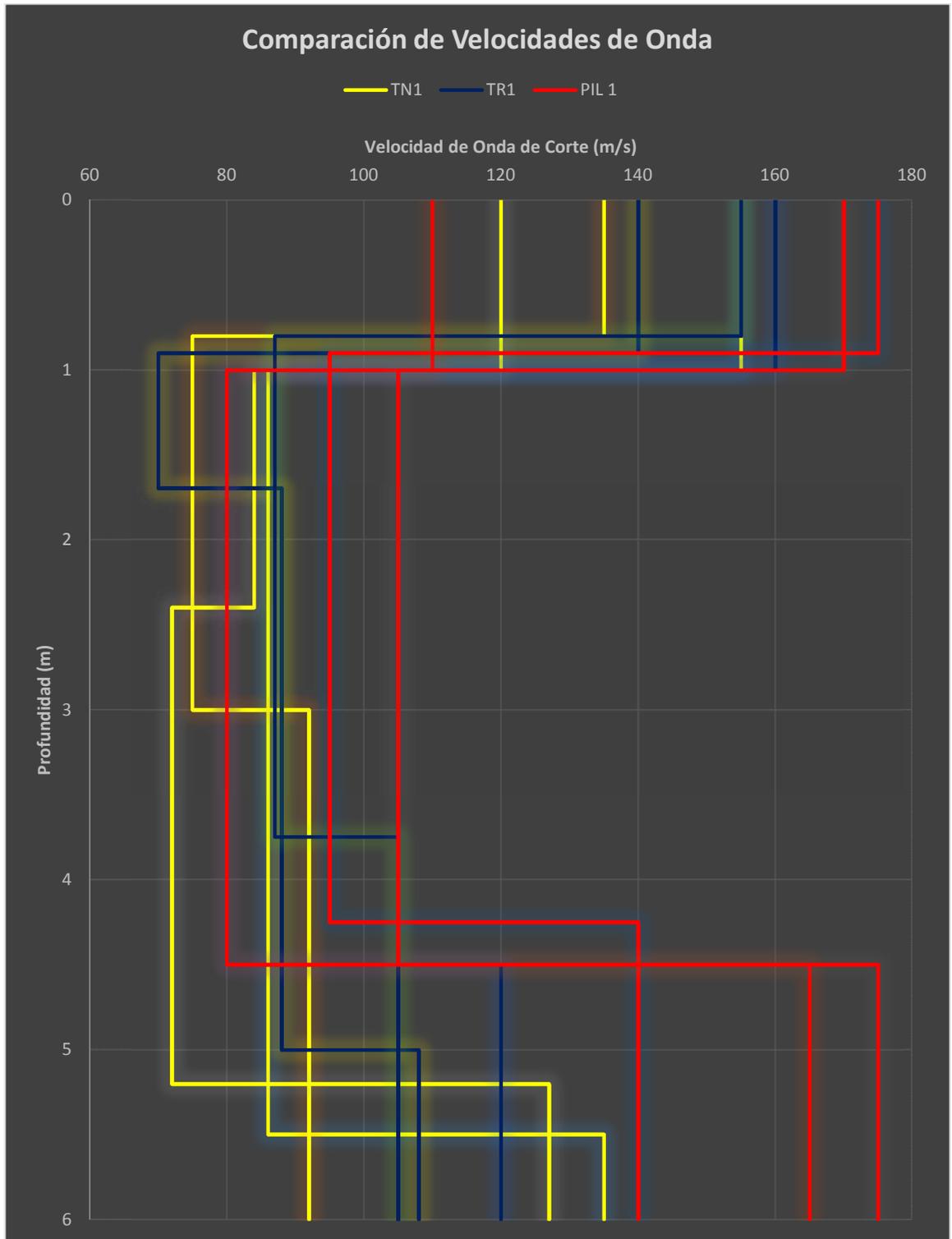


Figura 20. Gráfico de Vs de los 3 terrenos.

6.3. Resumen y discusión de resultados.

En la Figura 17 se pueden observar las distintas velocidades de onda recopiladas durante los ensayos en la estación 5 de la Aerovía. Claramente hay una tendencia de crecimiento en valores de V_s , como se esperaba, el terreno natural fue el que tuvo menores velocidades de Onda de corte, luego el relleno y finalmente el terreno con pilotes y relleno fue donde se obtuvieron los mayores V_s .

Se observa que al inicio hay una mayor diferencia entre el terreno natural y el terreno relleno, esto se debe a que el material relleno es de mejores propiedades que el que estaba anteriormente por lo que su V_s incrementará. Luego del metro de relleno, manejan velocidades muy parecidas, se esperaba que el suelo debajo del préstamo importado se haya compactado debido al peso del material y de la maquinaria que se usó para el trabajo y por ende arroje valores más altos. No hubo mucho tiempo entre que se hizo el relleno y los ensayos MASW, por lo que el suelo no ha alcanzó a consolidarse, otro factor importante es que el nivel freático es cambiante y no deja que el material debajo del relleno se drene y consolide. En un terreno con una cota mayor por encima del nivel del mar, podría obtenerse luego de que haya una consolidación, valores mayores de V_s .

La diferencia entre el terreno natural y terreno con pilotes es muy notoria, el suelo después del proceso de pilotaje, adquiere mayor resistencia, en algunos casos las velocidades hasta se duplican, esto se debe a que las partículas de suelo se reorganizan durante la hinca. En el primer metro se obtuvieron V_s altos, luego decrecen.

En el caso de pilotes 2 que tiene una velocidad baja en comparación a los otros dos, podría deberse a que la curva no permitía hacer la inversión por lo que se tuvieron que cortar varios puntos para poder obtener los valores de V_s .

Se observa que todos los ensayos después de los 4 metros empiezan a incrementar su velocidad de onda, por lo que se puede inferir que hay una capa de material más resistente.

Recomendaciones

- Para Foti et. Al. Recomienda que para exploraciones de poca profundidad se utilicen geófonos de menor sensibilidad de mayores hercios aproximadamente 10 Hz en adelante o acelerógrafos en caso de evaluar estructura de pavimentos debido a que se necesitan más cantidad de frecuencias
- El martillo a utilizar debería ser más liviano para no sobresaturar los geófonos
- Para ensayos activos se recomienda en lo posible o se deberían hacer cuando no haya ningún tipo de ruido. Si bien es cierto no se estaba trabajando en la obra, pero con el paso de vehículos a veces generaba con el terreno blando podía generar ruido u ondas, la cual es muy sensible en los primeros metros
- Debido a que realizar inversiones en perfiles inversos o que tengan una capa superior más rígidas que las siguientes, se deberá aplicar otra fórmula distinta a este tipo de inversión para poder encontrar los valores de Vs un método que se puede utilizar es analizar las curvas de Rayleigh sin realizar la inversión y usar las fórmulas de correlación con velocidad Rayleigh con velocidades de onda para encontrar los parámetros necesarios.
- En un futuro este método se podría utilizar usando mejores equipos y aplicando las recomendaciones descritas por los investigadores. Se puede usar para investigar las características de los suelos para la construcción de vías o pavimentos debido que la velocidad de onda se relaciona directamente con el módulo de corte y este a su vez se podría relacionar con el modulo elástico por la relación de Poisson.

Bibliografía

Ecuatoriano, G. (2018). *Especificaciones Técnicas Aerovía*. Guayaquil.

GEOTEM. (12 de 08 de 2019). *Sismica de Refracción*. Obtenido de <http://www.geotem.com.mx/sismico4.php>

Louie, J. N. (2001). Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth From Refraction Microtremor Arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 347-364.

Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *GEOPHYSICS*, 800-808.

QUEVEDO, B. (2018). *EL USO DE PRUEBAS GEOFISICAS DE VELOCIDAD DE ONDA (V_s) COMO COMPLEMENTO A LAS HERRAMIENTAS GEOTECNICAS PARA DETERMINAR LA PUNTA DE CIMENTACION EN PILOTES DISEÑADOS A RECHAZO HASTA PROFUNDIDADES DE 30 METROS*. Guayaquil.

ROLDOS, F. M. (2017). *EVALUACION Y COMPARACION DEL FACTOR DE SEGURIDAD CONTRA LA LICUACION PARA UN PROYECTO DE LA ISLA MOCOLI UBICADO EN EL CANTON SAMBORONDON, UTILIZANDO METODOLOGIAS PARA ENSAYOS DE PENETRACION ESTANDAR (SPT), ENSAYO DE PENETRACION DE CONO (CPT) Y PRUEBAS GEO*. Guayaquil.

Studies, G. (01 de 09 de 2019). *Geophysical Studies*. Obtenido de Geophysical Studies: <http://www.geophysicalstudies.cl/refraccion-masw.html>

Foti, S., Lai, C., Rix, G. J., & Strobbia, C. (2014). Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization. In *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. <https://doi.org/10.1201/b17268>

GEORYS INGENIEROS. (2016). *MICROTREPIDACION EN ARREGLOS MULTICANAL*.

Guarachi, F., Sáez, E., & Flórez, F. (2015). *MANUAL DE APLICACIÓN DE*

TÉCNICAS GEOFÍSICAS BASADAS EN ONDAS DE SUPERFICIE PARA LA DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO VS30.

Nalvarte, S., & Oyarce, J. (2018). *Obtención de perfiles de velocidad de ondas de corte mediante la inversión del cociente espectral H/V en el distrito de Santa Rosa - Lima*. <https://doi.org/10.19083/tesis/625208>

Olson. (2003). Crosshole / Downhole Seismic Application of.

Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves*. 64(3), 800–808.

Rivera, M., Piedra, R., & Paripanca, Y. (2016). *Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones*.

Rucker, M. (2003). Applying the refraction microtremor (ReMi) shear wave technique to geotechnical characterization. *Proceedings of the Third International Conference on Applied Geophysics*.



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Minuche Santana Christian Alejandro**, con C.C: # 0927195974 autor del trabajo de titulación: **“Uso de pruebas geofísicas de Velocidades de Onda (Vs) para comparar las diferencias entre suelo virgen, suelo con relleno compactado y relleno compactado con pilotes hincados en la estación 5 de la Aerovía”** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 9 de septiembre de 2019

f. _____

Minuche Santana Christian Alejandro

C.C: 0927195974

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	“Uso de pruebas geofísicas de Velocidades de Onda (Vs) para comparar las diferencias entre suelo virgen, suelo con relleno compactado y relleno compactado con pilotes hincados en la estación 5 de la Aerovía”		
AUTOR	Christian Alejandro Minuche Santana		
TUTOR	Ing. José Andrés Barros Cabezas		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Ingeniería		
CARRERA:	Carrera de Ingeniería Civil		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	9 de Septiembre de 2019	No. DE PÁGINAS:	53
ÁREAS TEMÁTICAS:	Geofísica, Suelos, Sísmica.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	MASW, velocidad de corte, Compactación, Relleno, Consolidación, Aerovía.		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>La evaluación del suelo presente en un terreno es vital a la hora de empezar una obra civil, es por esto que se estudia la posibilidad de encontrar nuevos métodos que simplifiquen y agilicen el trabajo de los ingenieros civiles. De aquí parte el estudio de las ondas superficiales y su aplicación en la geotecnia como un método que no altera el terreno y proporciona datos necesarios a priori al comienzo de una obra civil.</p> <p>El objetivo de esta investigación es usar el método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales para determinar si en realidad cambia el suelo debajo de diferentes tipos de cimentaciones y de qué manera afecta la misma a las propiedades mecánicas. Es decir, si el suelo se hace más resistente debido al peso y a la posterior consolidación o se mantiene en el mismo estado. Se consiguieron dichos resultados mediante ensayos en campo, procesamiento en oficina y el uso de programas de computadora que permitieron procesar los datos adquiridos en campo.</p> <p>Una vez que se obtuvieron los gráficos de las Velocidades de Onda de cada terreno, se procedió a analizar y ver que las cimentaciones superficiales no alteran de sobremanera el suelo que está por debajo. En el caso del terreno con pilotes se obtuvieron velocidades de onda bastante prometedoras comparándolas con los otros terrenos analizados. En algunos ensayos de pilotes se llegó a casi duplicar la velocidad del terreno natural.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593981620083	E-mail: Christian_minuche_12@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Clara Glas Cevallos		
	Teléfono: +593-4 -2206956		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			