



# INGENIERÍA DESARROLLO INTEGRADO CAMPO DINA T Y PALOGRANDE, CEBÚ, PIJAO

## INFORME DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA PG-10 AMPLIADA

REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ
P	30-Ago-22	Emitido para revisión interdisciplinaria	FESA	LDRT	RIGV
<b>PROYECTO WOOD No.</b> 07220100 10.00.121.000		<b>DOCUMENTO No.</b> ECP-USU-21170-GPA-IC01-0- GEN-IF-007-P			

<b>INGENIERÍA DESARROLLO INTEGRADO CAMPO DINA T Y PALOGRANDE, CEBÚ, PIJAO</b>  <b>INFORME EXPLORACIÓN GEOFÍSICA</b>	ECP-USU-21170-GPA-IC01-0- GEN-IF-007-P  <b>Documento No.</b>
	<b>Revisión: P</b>

**TABLA DE CONTENIDO**

**1.0 INTRODUCCIÓN..... 4**

**2.0 OBJETIVOS..... 4**

    2.1 OBJETIVO GENERAL .....4

    2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....4

**3.0 FUNDAMENTOS TEORICOS..... 5**

    3.1 REFRACCIÓN SÍSMICA.....5

        3.1.1 Procedimiento de Campo.....7

        3.1.2 Procesamiento de Datos.....8

        3.1.3 Curvas Tiempo Vs Distancia.....9

        3.1.4 Tomografía Sísmica.....9

    3.2 MASW.....9

**4.0 METODOLOGÍA ..... 13**

    4.1 PROCEDIMIENTO DE CAMPO.....13

    4.2 PROCESAMIENTO DE DATOS.....14

**5.0 DESCRIPCIÓN DE LA EXPLORACIÓN..... 17**

**6.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS ..... 19**

    6.1 REFRACCIÓN SÍSMICA.....19

    6.2 MASW.....21

**7.0 CONCLUSIONES..... 24**

**8.0 BIBLIOGRAFÍA..... 26**

<b>INGENIERÍA DESARROLLO INTEGRADO CAMPO DINA T Y PALOGRANDE, CEBÚ, PIJAO</b>	ECP-USU-21170-GPA-IC01-0- GEN-IF-007-P
	<b>Documento No.</b>
<b>INFORME EXPLORACIÓN GEOFÍSICA</b>	<b>Revisión: P</b>

### LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.	Conversión de una Onda Incidente P - Ley Snell, Adaptado B. Redpath. 1973.....	5
Figura 2.	Sismograma y Curva Domocrónica Adaptado B. Redpath. 1973. ....	6
Figura 3.	Procesamiento de Datos Obtenidos en Campo Adaptado B. Redpath. 1973. ....	7
Figura 4.	Procedimiento de Campo Sísmica de Refracción. (Tomado Manual Software Winsism V12. De Elisoft).....	8
Figura 5.	Selección de las Primeras Llegadas. Software Winsism V12. ....	8
Figura 6.	Domocrónicas. Software Winsism V12. ....	9
Figura 7.	Ondas Elásticas, Tomado de C.B Park, R.D Miller, Et al, 2007. ....	13
Figura 8.	Esquema Ensayo MASW. (Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1998)). ....	14
Figura 9.	Excitaciones Activas y Pasivas. (Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1998)) ....	14
Figura 10.	Registro Sísmico Tomado de Campo. Tomado de (Software WinmaswPro® de Elisoft). 15	
Figura 11.	Espectro de Onda Rayleigh. (Software WinmaswPro® de Elisoft).....	16
Figura 12.	Espectro de Velocidad de Fase de Onda Rayleigh. (Software WinmaswPro® de Elisoft). 16	
Figura 13.	Perfil de Velocidad de Onda de Corte. (Software WinmaswPro® de Elisoft).....	17
Figura 14.	Localización General de la Zona, Proyecto ODS-044-PG-10AMP.....	18
Figura 15.	Registro Fotográfico.....	19
Figura 16.	Perfil de Velocidad de Onda Compresional, Línea sísmica L1 ODS-044-PG-10AMP 20	
Figura 17.	Perfil de Velocidad de Onda Compresional, Línea sísmica L2 ODS-044-PG-10AMP 20	
Figura 18.	Imagen de Dispersión, Línea Proyecto ODS-044-PG-10AMP L1. ....	21
Figura 19.	Imagen de Dispersión, Línea Proyecto ODS-044-PG-10AMP L2. ....	22
Figura 20.	Perfil de Velocidad de Onda de Corte L1. ....	22
Figura 21.	Perfil de Velocidad de Onda de Corte L2. ....	23
Figura 22.	Comparación de velocidades y capas LOCACIÓN 2.....	25

### LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.	Coordenadas de los Ensayos.....	18
Tabla 2.	Perfil de Velocidad Promedio de Onda Compresional (Vp) Promedio.....	21
Tabla 3.	Módulo de Poisson en función de la velocidad de propagación de onda Vp y Vs.....	23
Tabla 4.	Perfil de Velocidad de Onda Cortante (Vs) Promedio. ....	24
Tabla 5.	Perfil de Velocidad NSR-10.....	24

<b>INGENIERÍA DESARROLLO INTEGRADO CAMPO DINA T Y PALOGRANDE, CEBÚ, PIJAO</b>	ECP-USU-21170-GPA-IC01-0- GEN-IF-007-P  <b>Documento No.</b>
<b>INFORME EXPLORACIÓN GEOFÍSICA</b>	<b>Revisión: P</b>

## 1.0 INTRODUCCIÓN

Los ensayos como la refracción sísmica y los ensayos de dispersión de ondas superficiales son técnicas que se enmarcan en los métodos de exploración geofísica y estudian la propagación de ondas elásticas producidas de forma natural y artificial las a través de los medios.

Los métodos sísmicos se enmarcan en los métodos indirectos de investigación, es decir, dentro de aquellos que se realizan sin necesidad de alterar el terreno y que por lo tanto tampoco permiten la observación de este.

Estos métodos por ser métodos no invasivos proveen una herramienta valiosa en términos de tiempo y costo para obtener información de alta confiabilidad relacionada las propiedades mecánicas y dinámicas del subsuelo, la confiabilidad de los ensayos geofísicos depende de diferentes componentes como las condiciones generales del sitio, la pendiente del terreno, el arreglo con el cual se ejecute cada ensayo etc.

## 2.0 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la exploración geofísica del predio donde se localizará el proyecto, mediante el uso del ensayo de Refracción Sísmica y dispersión de ondas superficiales MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), los cuales proporcionan como resultado los perfiles de velocidad de propagación de onda Compresional ( $V_p$ ) y cortante ( $V_s$ ) en profundidad.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar la estratificación del subsuelo y las características de los materiales que lo componen con el fin de cotejar los resultados con la exploración directa.
- Determinar por medio de procedimientos de inversión a través de la velocidad de propagación de la onda Rayleigh la velocidad de propagación de la onda cortante, densidad de los materiales en superficie y relación de Poisson.
- Estimar los parámetros elásticos de los materiales tales como módulo de Young (E) y módulo de rigidez o cortante (G).
- Establecer la clasificación del perfil del subsuelo de acuerdo con los requerimientos impuestos por el capítulo A.2.4-1 de la NSR-10 por medio de mediciones de velocidad de propagación de ondas en campo, sin necesidad de acudir a correlaciones.
- Obtener la Pseudo Sección en 2D en función de la velocidad de onda compresional ( $V_p$ ), del perfil del subsuelo en los sitios donde se realizaron los ensayos.

### 3.0 FUNDAMENTOS TEORICOS.

#### 3.1 REFRACCIÓN SÍSMICA.

El método de refracción sísmica se basa en el registro de los frentes de onda, generados por una fuente artificial de energía, leyendo en los registros los tiempos de los primeros arribos (first breaks). Estos pueden deberse a la onda directa o bien a aquellas ondas que se refractan en el subsuelo con el ángulo crítico, viajan por la interfaz con la velocidad del medio infrayacente y retornan hacia la superficie como ondas frontales (head waves).

El método se aplica siempre que se encuentren medios con impedancias acústicas contrastantes, con la condición esencial dada por la Ley de Snell donde el segundo medio es de mayor velocidad de tránsito que el primero.

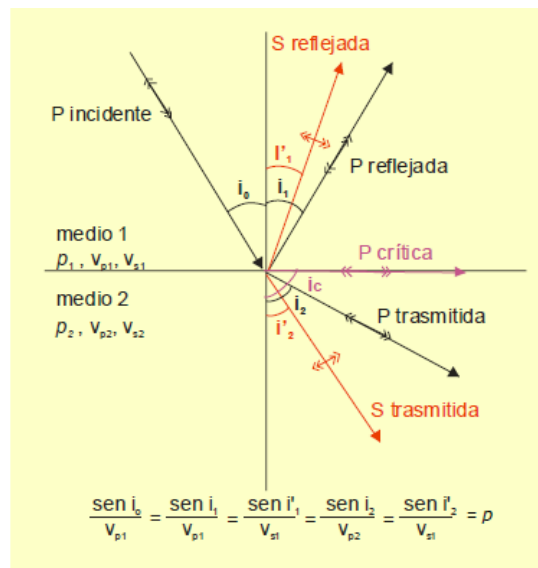


Figura 1. Conversión de una Onda Incidente P - Ley Snell, Adaptado B. Redpath. 1973

La profundidad a la que se puede prospectar se encuentra aproximadamente entre 1/3 y 1/2 de la longitud del tendido de los geófonos en superficie dependiente del método que se use en la prospección. El objetivo es determinar espesores de las capas del subsuelo, sus buzamientos y las velocidades de propagación de las ondas sísmicas en cada una de ellas, los métodos dependen principalmente de la magnitud y el tipo de fuente artificial con la cual se genera el impacto y el tren de ondas, para el caso particular del proyecto se empleó una fuente manual tipo almódana de 18.0 lbs de masa.

Los datos de la refracción adquiridos en campo se representan mediante el trazado en una curva domocrónica de tiempo vs distancia, con estas rectas como las dibujadas por Mohorovicic, con un número suficiente de puntos para cada tramo correspondiente a cada una de las interfaces refractoras buscadas. En las curvas domocrónicas se registran las primeras llegadas de las ondas P a los receptores y se presentan en función del tiempo y la distancia.

Esto nos define trayectorias, cada una de las cuales nos indica la existencia de medios con impedancias acústicas diferentes. La pendiente de estas trayectorias representa la inversa de la velocidad en cada medio. La base del método es la extensión a las ondas sísmicas de la Ley de Snell como se puede observar en la Figura 1. Se trabaja con los primeros arribos de los frentes de ondas sísmicas, las cuales incluyen a los siguientes tipos de ondas compresionales o P.

- Directas
- Reflejadas
- Frontales, refractadas con el ángulo crítico.

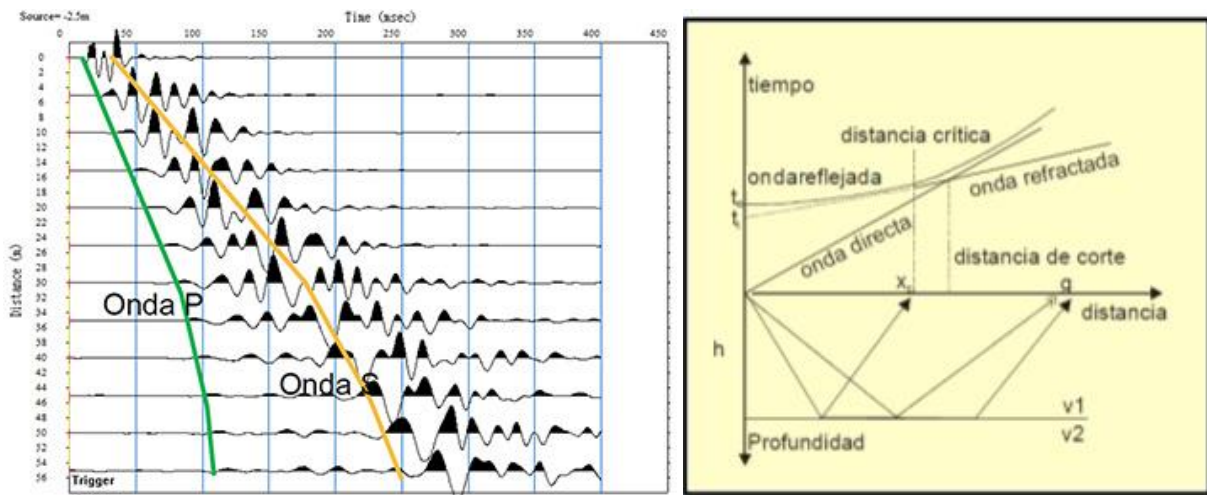


Figura 2. Sismograma y Curva Domocrónica Adaptado B. Redpath. 1973.

De una domocrónica (Figura 2) podemos obtener entonces los siguientes datos:

- Las velocidades correspondientes a cada medio.
- La profundidad o espesor desde la superficie.

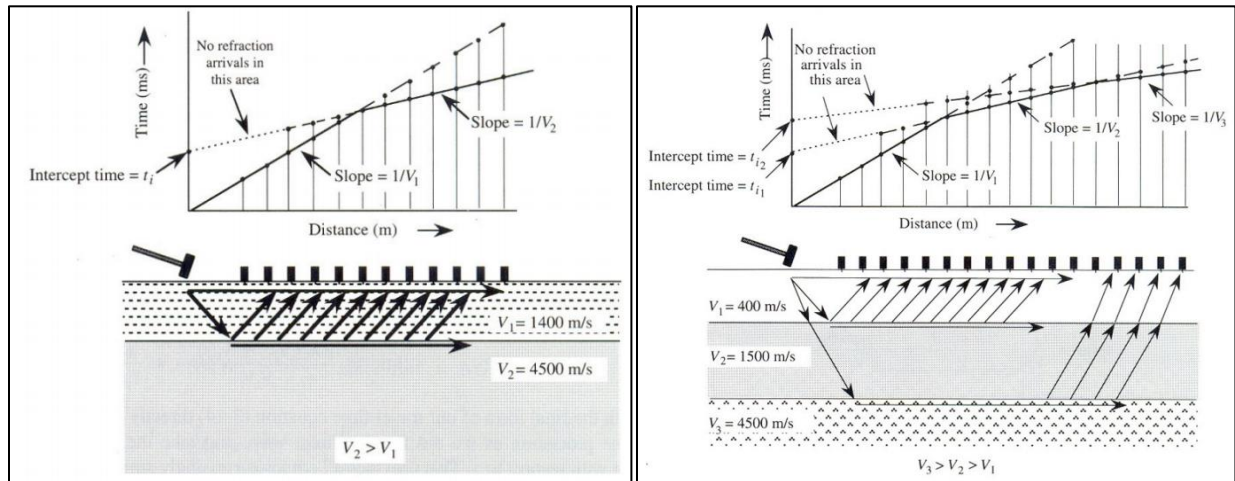


Figura 3. Procesamiento de Datos Obtenidos en Campo Adaptado B. Redpath. 1973.

- La primera recta, que parte del origen de coordenadas, representa la onda directa, que viaja por la capa más superficial desde el origen de la fuente de energía hacia los geófonos. Su ecuación es  $t=x/v_1$ ; donde  $V_1$  es la velocidad de la primera capa.
- La segunda recta representa la onda refractada en la interface entre la primera y segunda capa. Su ecuación es  $t=T_1+ x/V_2$  donde  $V_2$  es la velocidad de la segunda capa y  $T_1$  es el tiempo en el origen de la primera capa. Así mismo, según la Ley de Snell, se verifica que  $\sin(i_c)= V_1/V_2$ , donde  $i_c$  es el ángulo de incidencia. Ver Figura 3.

Es muy importante tener presente que el tiempo de intercepción resulta gráficamente de la prolongación de la recta  $1/V_2$  hasta el eje de coordenadas, con lo cual eliminamos uno de los términos de la expresión final antes citada, justamente el que contiene  $X$ , y simplificamos los cálculos.

### 3.1.1 Procedimiento de Campo.

Se disponen 24 geófonos espaciados de forma equidistante de 5.0m para una longitud de 72.0m esto condicionado por el espacio del área de trabajo. Se realizan lecturas de ida y vuelta con impactos distribuidos de forma simétrica sobre el tendido, ver Figura 4.

Para este proyecto se realizaron 5 disparos espaciados de forma equidistante, tomando en consideración dos disparos externos a la línea denominada OFFSET SHOTS.

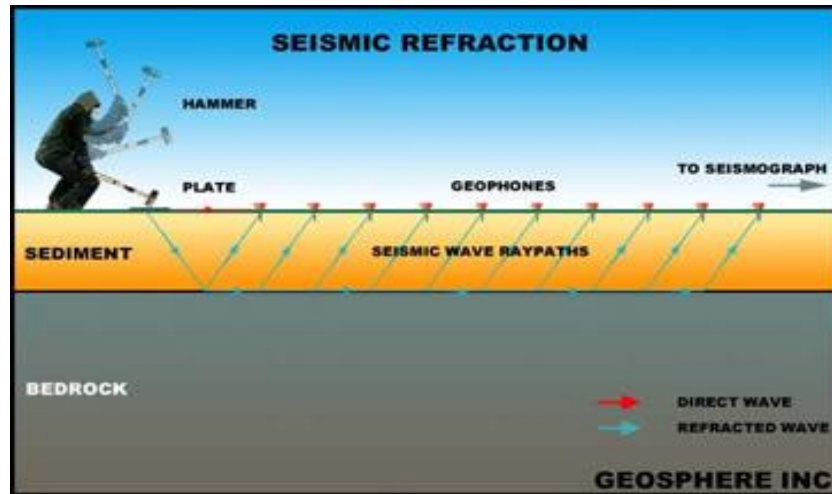


Figura 4. Procedimiento de Campo Sísmica de Refracción. (Tomado Manual Software Winsism V12. De Elisoft).

### 3.1.2 Procesamiento de Datos.

La detección de la primera llegada se realiza sobre la base del cambio producido por la señal captada, cuando la traza pasa de contener solo ruido a contener ruido y señal. En el análisis de selección de los primeros arribos, son necesarios los conocimientos de propagación de las ondas sísmicas con el fin de diferenciar las ondas P de llegada de la refracción de otras ondas sísmicas como la Rayleigh y las ondas S. El proceso final es calcular la velocidad de las Ondas P y el espesor de cada capa con base a los datos de la gráfica Tiempo-recorrido. Ver Figura 5.

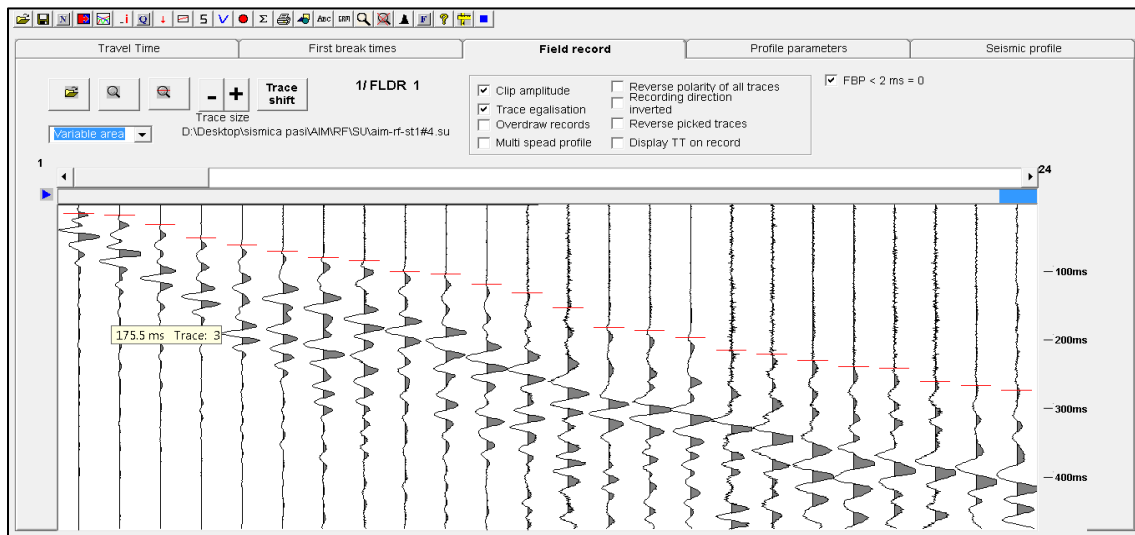


Figura 5. Selección de las Primeras Llegadas. Software Winsism V12.

### 3.1.3 Curvas Tiempo Vs Distancia.

Las curvas tiempo distancia se construyen con los tiempos de llegada de las ondas P a cada uno de los geófonos, y la distancia de cada sensor al punto de impacto. Ver Figura 6. Los tiempos de llegada pueden ser leídos directamente en la pantalla de la unidad de adquisición. El conjunto de registros (del total de geófonos) como se pueden apreciar en una impresión realizada desde la unidad de adquisición, son mostrados en la Figura 6 en la sísmica de refracción. En ella se esquematiza la llegada de la onda directa, la onda refractada y los procesos de reflexión.

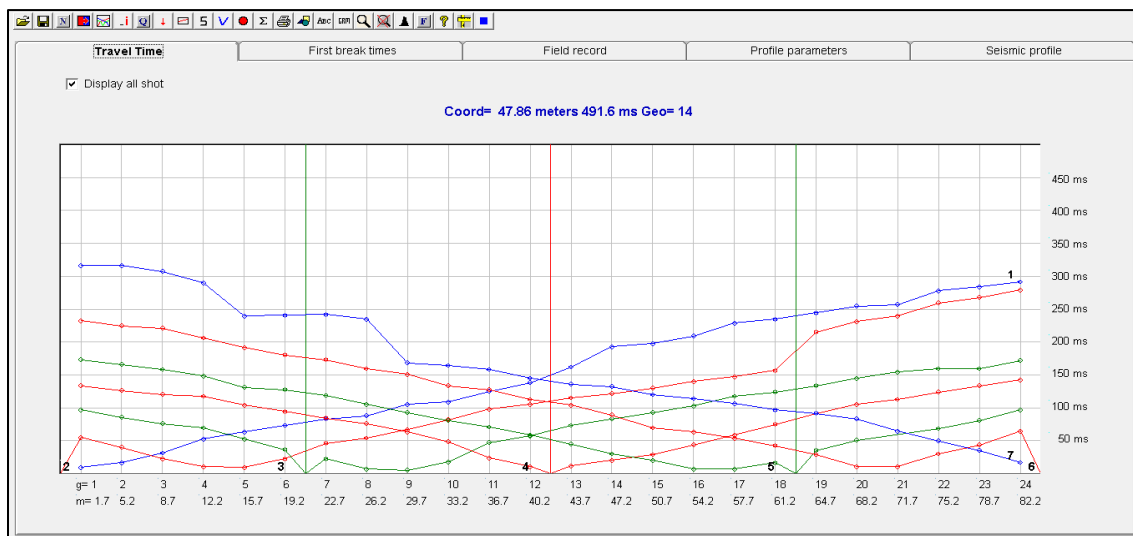


Figura 6. Domocrónicas. Software Winsism V12.

### 3.1.4 Tomografía Sísmica.

La tomografía sísmica es un método de análisis por medio de elementos finitos, que permite generar un modelo detallado de la presencia de capas, generando las trayectorias de las diferentes componentes de las ondas provocadas con los impactos.

Como resultado se presenta un modelo, en el que se evidencia la variación de la velocidad Compresional ( $V_p$  con respecto a la profundidad, reflejando el cambio de rigideces y a su vez reflejando la estratificación del perfil, en las unidades (m/s).

Las tomografías sísmicas, son útiles para la identificación del estrato portante o basamento rocoso y la identificación de la profundidad del nivel freático en el subsuelo.

## 3.2 MASW.

El perfil de velocidades de ondas de corte es fundamental para la caracterización de un sitio y la evaluación de su respuesta dinámica (Tokimatsu et al., 1991). Para ello, existen métodos geofísicos no invasivos que permiten inferir las propiedades dinámicas de los suelos de un sitio a muy bajo costo y sin la necesidad de realizar exploraciones directas.

<b>INGENIERÍA DESARROLLO INTEGRADO CAMPO DINA T Y PALOGRANDE, CEBÚ, PIJAO</b>  <b>INFORME EXPLORACIÓN GEOFÍSICA</b>	ECP-USU-21170-GPA-IC01-0- GEN-IF-007-P  <b>Documento No.</b>
	<b>Revisión: P</b>

Dentro de los métodos geofísicos indirectos, se encuentran aquellos basados en el análisis de ondas superficiales. Dentro de los más conocidos de esta categoría se encuentran los métodos de Análisis Espectral de Ondas Superficiales (Nazarian et al., 1983) y/o de Análisis Multi-canal de Ondas Superficiales (Park et al., 1999), que se basan en la propiedad de dispersión de las ondas superficiales tipo Rayleigh para calcular la velocidad de fase de estas ondas a distintas frecuencias. Luego, a través de un proceso de inversión no lineal, se busca un perfil teórico que se ajuste a la curva de dispersión experimental. Una de las ventajas de estos métodos frente a otras técnicas geofísicas tradicionales, es que estos métodos permiten detectar estratos de suelos más blandos, bajo otros más rígidos.

Más de dos tercios de la energía que se registran en estudios sísmicos corresponden a ondas de Rayleigh (Richart et al., 1970), que a su vez corresponden a la principal componente de la vibración vertical en la superficie del suelo (Park et al., 1999). En un medio estratificado, la velocidad de propagación (velocidad de fase) de las ondas de Rayleigh depende de la frecuencia. Esta propiedad se conoce como dispersión. El gráfico que muestra la dependencia de la velocidad de fase con la frecuencia se conoce como curva de dispersión (Tokimatsu et al., 1991).

Diversos autores, como (Nazarian et al., 1983), (Stokoe et al., 1994), (Park et al., 1999) han propuesto el uso de la naturaleza dispersiva de las ondas superficiales para la caracterización de suelos. (Foti, 2000), resume el procedimiento para la caracterización geotécnica basado en el análisis de la dispersión de ondas superficiales, en tres partes:

- (a) Observación y registro de ondas superficiales.
- (b) Determinación de sus características dispersivas.
- (c) Inversión de la curva de dispersión y estimación del perfil de velocidad de ondas de corte.

El método de ondas superficiales fue el desarrollo del análisis multicanal de ondas superficiales MASW por sus siglas en inglés, introducido por (Park et al., 1999). En el MASW un arreglo lineal de 12 (o más) geófonos verticales (con frecuencia natural entre 4.5 – 10 Hz) es usado para el registro de las vibraciones generadas por una fuente impulsiva (golpe de martillo) o fuentes vibratorias, situadas a una distancia apropiada al del final del arreglo.

El esquema de procesamiento de datos en el método MASW es diferente comparado con el método SASW, en vez de medir la diferencia de fase de las llegadas de las ondas a los receptores, una imagen de dispersión es construida mediante la transformación del dominio tiempo-espacio (t-x) en diferentes dominios (usualmente el dominio de frecuencia-número de onda (f-k) o frecuencia-velocidad de fase (f-Vr)). La imagen de dispersión permite la identificación de las tendencias de dispersión a partir del patrón de acumulación de energía y la extracción de la(s) curva(s) de dispersión del espectro máximo.

Existen cuatro tipos de transformaciones usadas para el procesamiento de datos en el método MASW.

<b>INGENIERÍA DESARROLLO INTEGRADO CAMPO DINA T Y PALOGRANDE, CEBÚ, PIJAO</b>  <b>INFORME EXPLORACIÓN GEOFÍSICA</b>	ECP-USU-21170-GPA-IC01-0- GEN-IF-007-P  <b>Documento No.</b>
	<b>Revisión: P</b>

- Transformación Frecuencia – Numero de onda (F-K), que es realmente una doble transformación de Fourier a los datos obtenidos en campo (Gabriels et al., 1987)
- Transformación Frecuencia-Lentitud (F-P), que es una transformación bi dimensional combinada con una transformación P-Tau o “slant-stack”, de los registros de tiempo de los geófonos y la suma del espectro de potencia de las trazas transformadas para cada frecuencia (McMechan and Yedlin, 1981).
- Transformación Phase-Shift la cual puede ser considerada como un esquema compuesto por los métodos P-Tau y F-K, (Dal Moro et al., 2003; Park et al., 1998)
- Transformación conformador cilíndrico o “Cylindrical beamformer”, el cual es el único método que trata el registro multicanal como un campo de ondas cilíndrico y permite la mitigación de los efectos near-field (Zywicki and Rix, 2005), los demás métodos tratan el registro multicanal como campos de onda planas.

Para el método MASW tanto activo como pasivo, el procedimiento de inversión o el retro cálculo de la velocidad de onda cortante  $V_s$  desde la curva de dispersión seleccionada de la imagen de dispersión determinada por cualquiera de los métodos antes descritos, es el mismo y se considera quizás como el procedimiento más complejo de los que se contemplan dentro de los métodos de ondas superficiales. El problema de retro calculo o inversión no puede ser solucionado en términos de una solución pues este requiere de técnicas de optimización a fin de encontrar la solución más probable u optima dentro de un gran número de posibles soluciones.

Como bien se ha venido mencionando las propiedades elásticas de los materiales y sus efectos en la propagación de ondas son de fundamental interés en la ingeniería geotécnica. En especial la velocidad de onda cortante  $V_s$  es un parámetro fundamental en este campo de la ingeniería. Las ondas superficiales son guiadas y dispersivas. Las ondas Rayleigh (1985) son ondas que viajan a lo largo de la superficie libre. Las ondas Rayleigh son producidas o resultan de la interferencia entre las ondas compresionales P y cortantes S. El movimiento de una partícula de onda Rayleigh en su modo fundamental moviéndose de izquierda a derecha es elíptico en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Considerando lo anterior, además que las ondas Rayleigh se propagan en un medio estratificado, la velocidad de fase de la onda Rayleigh depende o es función entonces, además de la frecuencia, de cuatro grupos de propiedades del subsuelo (Velocidad de onda compresional, velocidad de onda cortante, espesor de las capas y densidad de los materiales). Por lo tanto, como prerrequisito para la solución de un problema de inversión, se requiere de la construcción de un modelo inicial el cual deberá contener una estimación de las variables antes mencionadas del perfil de suelo al cual le corresponde una curva de dispersión teórica. (Stokoe et al., 1994) plantea algunas formulaciones para obtener aproximaciones no muy distantes de las propiedades del medio.

<b>INGENIERÍA DESARROLLO INTEGRADO CAMPO DINA T Y PALOGRANDE, CEBÚ, PIJAO</b>  <b>INFORME EXPLORACIÓN GEOFÍSICA</b>	ECP-USU-21170-GPA-IC01-0- GEN-IF-007-P  <b>Documento No.</b>
	<b>Revisión: P</b>

Seguido de la determinación de un apropiado modelo inicial, el proceso de inversión comienza con el cálculo de la curva de dispersión correspondiente al modelo definido. El desajuste entre la curva teórica y la experimental determinada por medio de la imagen de dispersión generada a partir del registro multicanal obtenido en campo, es determinado a través de una función, llamada función objetivo, si este es mayor a un valor prescrito, las propiedades del perfil son revisadas y un valor actualizado de la función objetivo es obtenido. A través de un número de iteraciones la función objetivo es minimizada y una aceptable cercanía entre las dos curvas es alcanzada.

Las iteraciones pueden ser llevadas a cabo de forma manual por modelaciones iterativas “Forward Model ing” o automática a través de inversión (Pelekis and Athanasopoulos, 2011). Existen investigaciones que reportan el desarrollo diferentes técnicas automáticas de inversión en desde los últimos 15 años. Sin embargo, el uso de técnicas de modelaciones iterativas continúa ofreciendo mayores ventajas (Gardner et al., 2009; Louie, 2001). En las técnicas automáticas los algoritmos empleados son tanto de tipo de búsqueda global como local. Las técnicas de inversión con búsqueda local llegan a ser más efectivas cuando se incorporan estrategias tales como: (1) reducir el número de incógnitas (ej. Asumir el mismo número valor de densidad para todas las capas) y (2) introducir limitaciones (ej. Limitar valores de espesor de capas) (Pelekis and Athanasopoulos, 2011). Cabe resaltar que usando algoritmos de búsqueda local existe la posibilidad de localizarse o quedar atrapado en mínimos locales, este riesgo puede ser evitado usando algoritmos de búsqueda global tales como, redes neuronales, método de Monte Carlo (Beaty et al., 2002), algoritmos genéticos (Dal Moro et al., 2007; Wathelet, 2005), o mediante la combinación de algoritmos tanto de búsqueda local como global (Degrande et al., 2008).

La inversión de los datos de dispersión es usualmente basada en el modo fundamental de la propagación de las ondas tipo Rayleigh, sin embargo, es posible además de ventajoso considerar dos o más modos, el uso de un análisis de conjunto entre el modo fundamental y los demás modos permite la obtención de la relación de amortiguamiento del perfil (Foti, 2003)

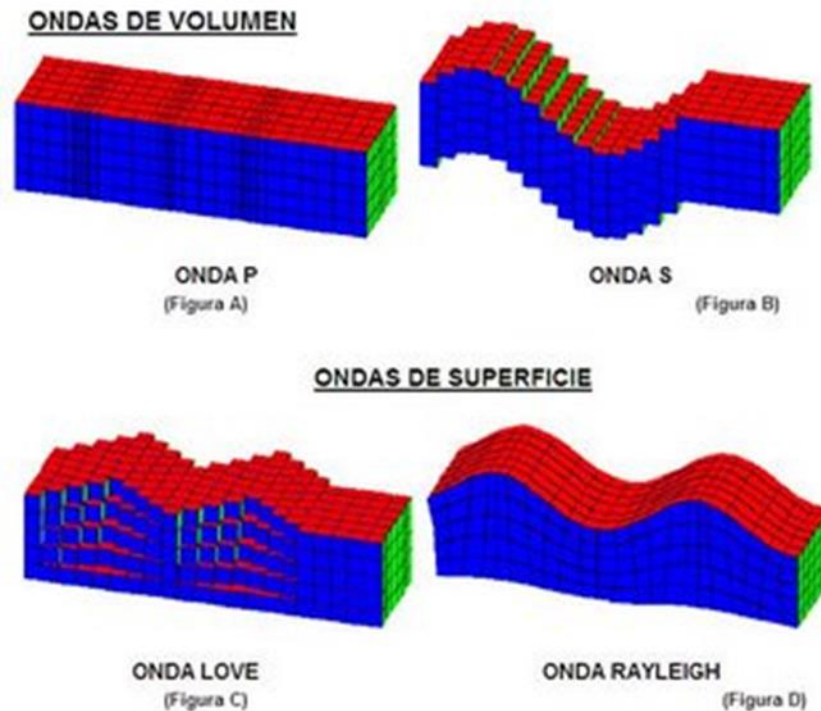


Figura 7. Ondas Elásticas, Tomado de C.B Park, R.D Miller, Et al, 2007.

## 4.0 METODOLOGÍA

### 4.1 PROCEDIMIENTO DE CAMPO.

Para la realización del ensayo, se disponen los geófonos verticales espaciados de forma equidistante para una longitud variable dependiendo del sector y de las características del terreno, sobre el arreglo se realiza una única lectura con disparo a una distancia de 5.0 metros del primer geófono, con el fin de registrar el contenido frecuencial de las ondas superficiales tipo Rayleigh a intervalos de muestreo de 1.024 ms o ground roll, para el caso activo.

En el caso pasivo, el arreglo geométrico de la adquisición es idéntico, sin embargo, dado que no existen excitaciones artificiales que generen trenes de ondas simétricos, se realizan tomas a intervalos de muestreo de 32.768 ms con el fin de tomar una diversidad de ruido ambiental, el cual se caracteriza por sus bajos contenidos frecuenciales, para aumentar la resolución de la información es recomendable realizar perturbaciones artificiales durante los muestreos para el aumento del contenido frecuencial.

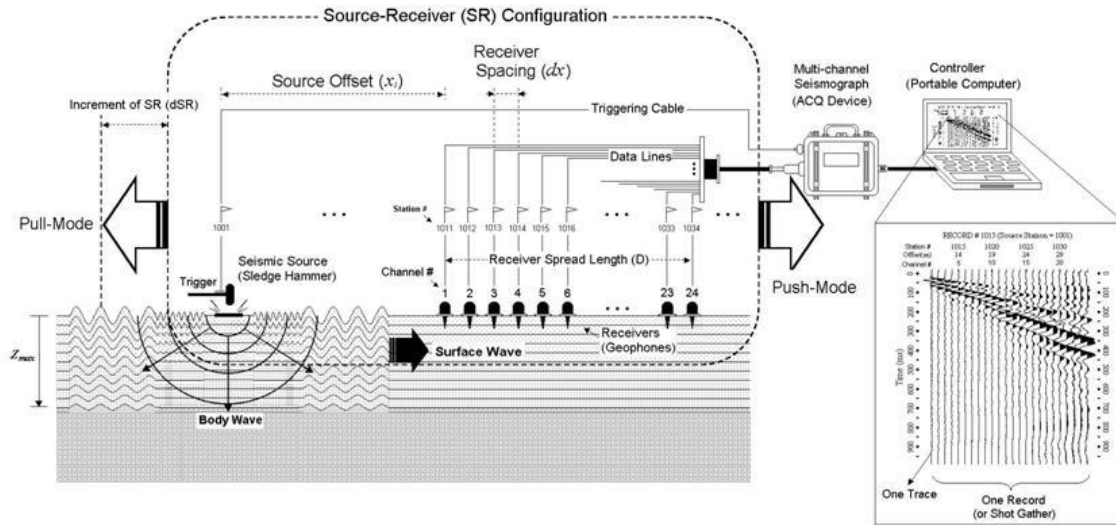


Figura 8. Esquema Ensayo MASW. (Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1998)).

Active (A) and Passive (P) Surface Waves  
Propagating In-line (i) and Off-line (o)

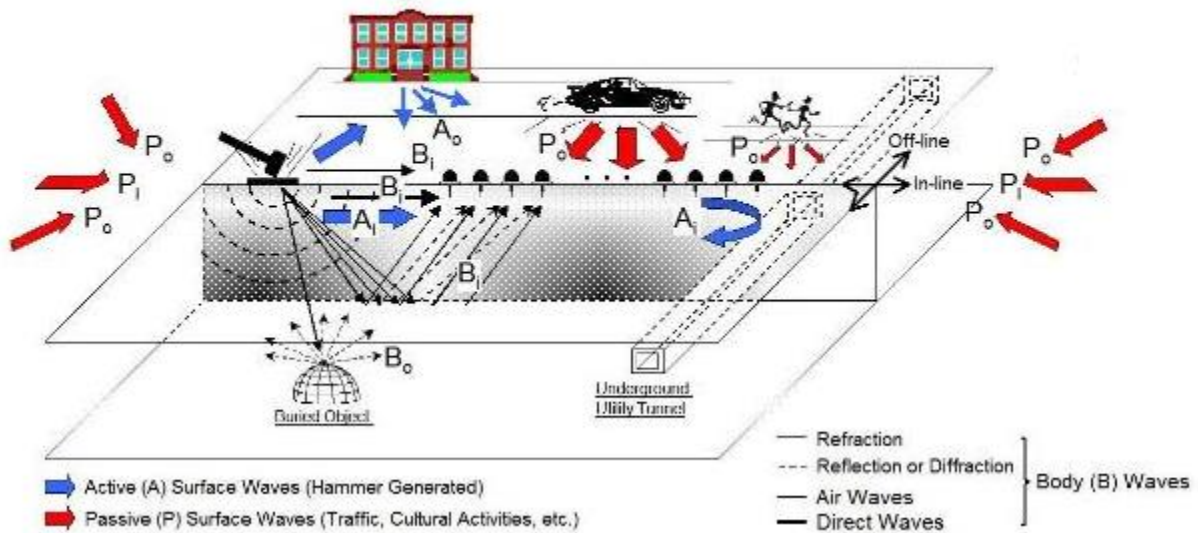


Figura 9. Excitaciones Activas y Pasivas. (Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1998))

## 4.2 PROCESAMIENTO DE DATOS.

Como se mencionó anteriormente, durante un impacto o excitación pasiva se generan diferentes tipos de ondas, las cuales todas son registradas por los geófonos dispuestos en un arreglo lineal y mostradas como un registro sísmico.

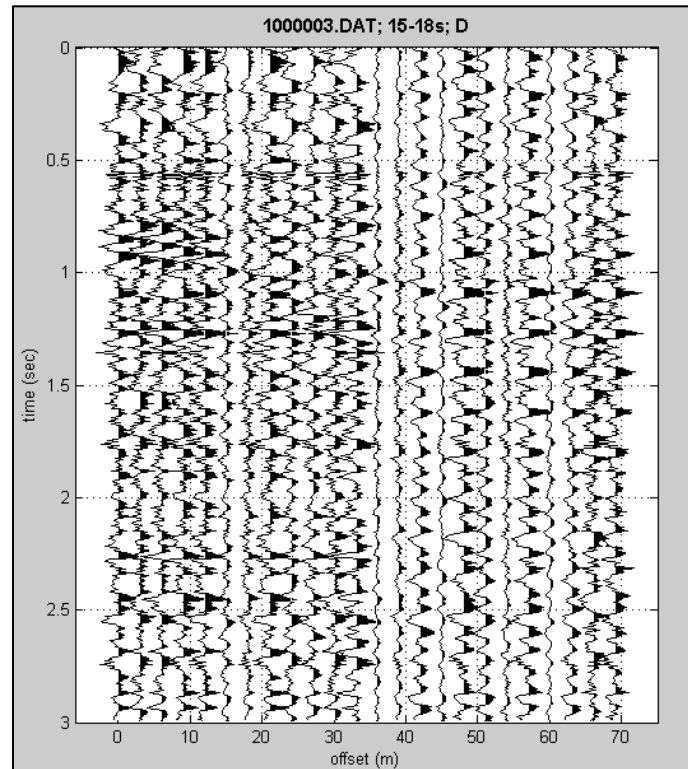


Figura 10. Registro Sísmico Tomado de Campo. Tomado de (Software WinmaswPro® de Eliosoft).

Con el fin de separar las ondas superficiales de los otros tipos de ondas, se han desarrollado varias transformaciones matemáticas, las cuales su objetivo principal es convertir un registro de señales que se encuentra en el dominio de tiempo y transformarlo en otro dominio tipo frecuencial para poder señalar el componente de interés del ruido.

El software WinmaswPro® de Eliosoft permite realizar entre otras la trasformada Phase-shift, descrita en el capítulo anterior. El resultado de la aplicación de esta metodología es la construcción de un espectro de energía en el dominio de la Frecuencia vs Velocidad de fase. Si bien las ondas superficiales se pueden presentar en diferentes modos distintos al fundamental, la estructura de la velocidad de corte  $V_s$  depende principalmente del modo fundamental. No obstante, en perfiles muy heterogéneos y con altos grados de anisotropía las ondas superficiales son susceptibles a manifestarse en modos superiores al fundamental.

Dado a que pueden existir errores en la inversión de los datos porque en ocasiones es difícil diferenciar el modo fundamental de los demás modos, se realiza un modelo de inversión de datos, tomando en consideración el espectro generado para las ondas Rayleigh.

Sin embargo, debido a que el registro de ondas pasivas se realiza en intervalos de tiempo altos, esto nos permite generar diferentes espectros de velocidad fase de onda de Rayleigh vs. Frecuencia para los diferentes tiempos de muestreo, con el fin de seleccionar el espectro

que mejor evidencie el modo o los modos de vibración, para así determinar la mejor aproximación a la curva de dispersión experimental.

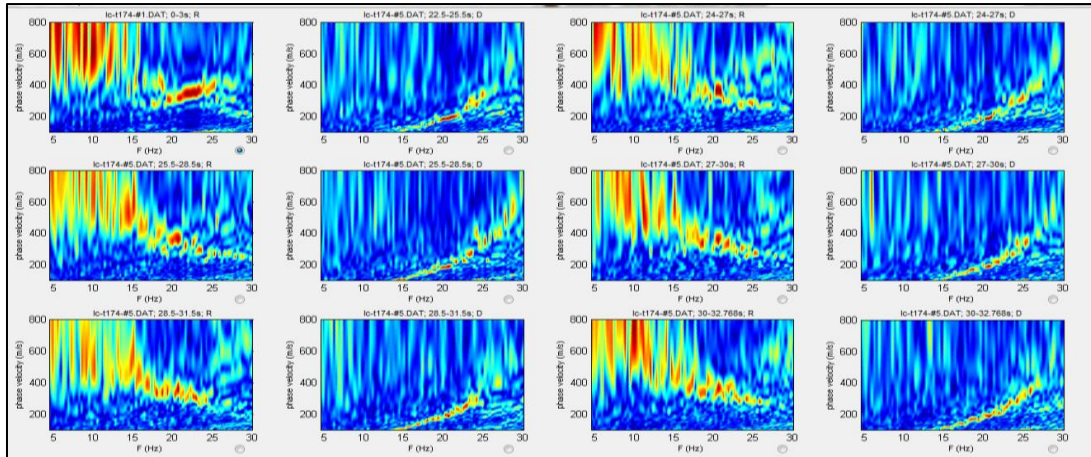


Figura 11. Espectro de Onda Rayleigh. (Software WinmaswPro® de Eliosoft).

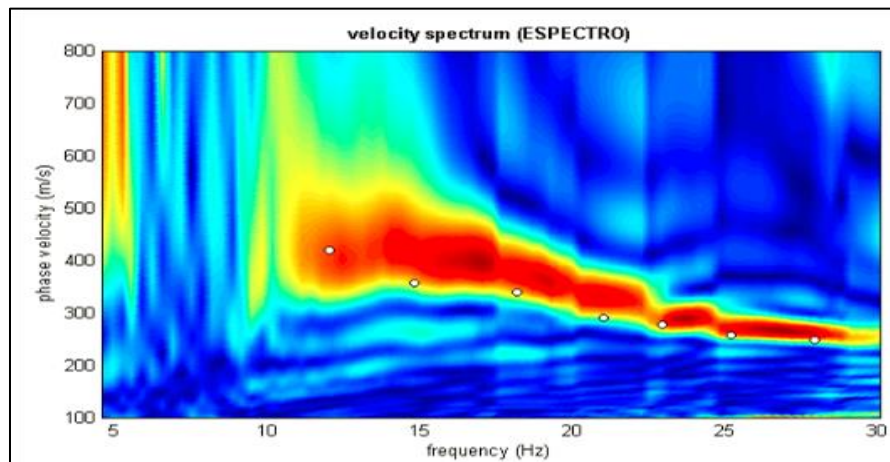


Figura 12. Espectro de Velocidad de Fase de Onda Rayleigh. (Software WinmaswPro® de Eliosoft).

Posterior al cálculo del espectro de velocidades tomando en consideración tanto el espectro de velocidades Rayleigh, y luego de la inversión de los datos, mediante un proceso iterativo en el cual se consideran infinitos modelos se determina el perfil de velocidades de onda cortante para el sitio de estudio como se ilustra en siguiente figura.

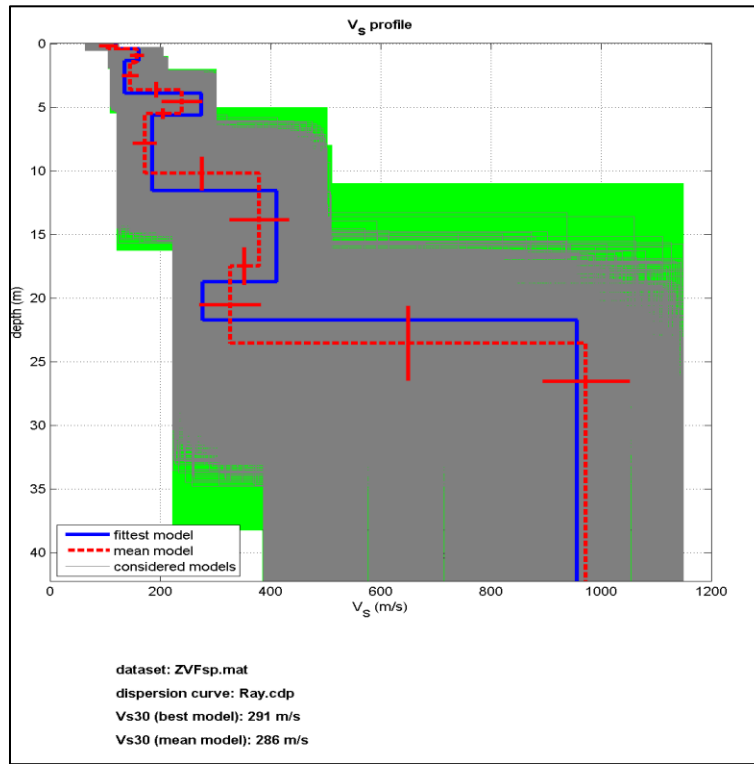


Figura 13. Perfil de Velocidad de Onda de Corte. (Software WinmaswPro® de Eliosoft).

## 5.0 DESCRIPCIÓN DE LA EXPLORACIÓN.

Debido a la necesidad de conocer la estratificación y la clasificación del subsuelo, además tomando en consideración la complejidad del proyecto y las características de la zona estudiada, se realiza la exploración mediante dos (2) ensayos de refracción sísmica y de dispersión de ondas superficiales tipo MASW Pasivo - ReMi, haciendo uso de dos (2) arreglos, donde en cada línea se usaron 24 geófonos verticales de 4,5 Hz, espaciados de forma equidistante 5,0 metros para una longitud total de línea 120,0 metros. Para la adquisición de las señales de refracción sísmica fue necesario realizar un número de 5 registros por línea, donde cada registro consiste en un apilamiento de entre 3 a 5 golpes a lo largo del tendido sísmico, registros que se configuraron en un tiempo de muestreo de 256ms, a razón de 125 $\mu$ s. Para el ensayo tipo MASW pasivo – ReMi, se realizan lecturas pasivas excitadas por el ruido ambiental y micro trepidaciones (ver Figura 14), a tiempos de muestreo de 32,768 ms y registros en intervalos de 2 ms. Adicionalmente, con el fin de aumentar el contenido frecuencial del registro de ondas Rayleigh, se realizan excitaciones aleatorias a través de golpe de martillo en la longitud total de la línea.

La localización en planta del ensayo se realizó de acuerdo con el criterio técnico de la compañía Wood, con relación a la distribución de las zonas de análisis se realizó como bien se ha mencionado dos (2) arreglos lineales, mediante los cuales se pretendió realizar la caracterización y clasificación del perfil de suelo del sitio de interés.

Tabla 1. Coordenadas de los Ensayos.

Línea	Punto	Norte	Este	Longitud (m)
L1	Inicio	829108	865309	120,0
	Fin	829035	865290	
L2	Inicio	829044	865280	120,0
	Fin	828986	865310	

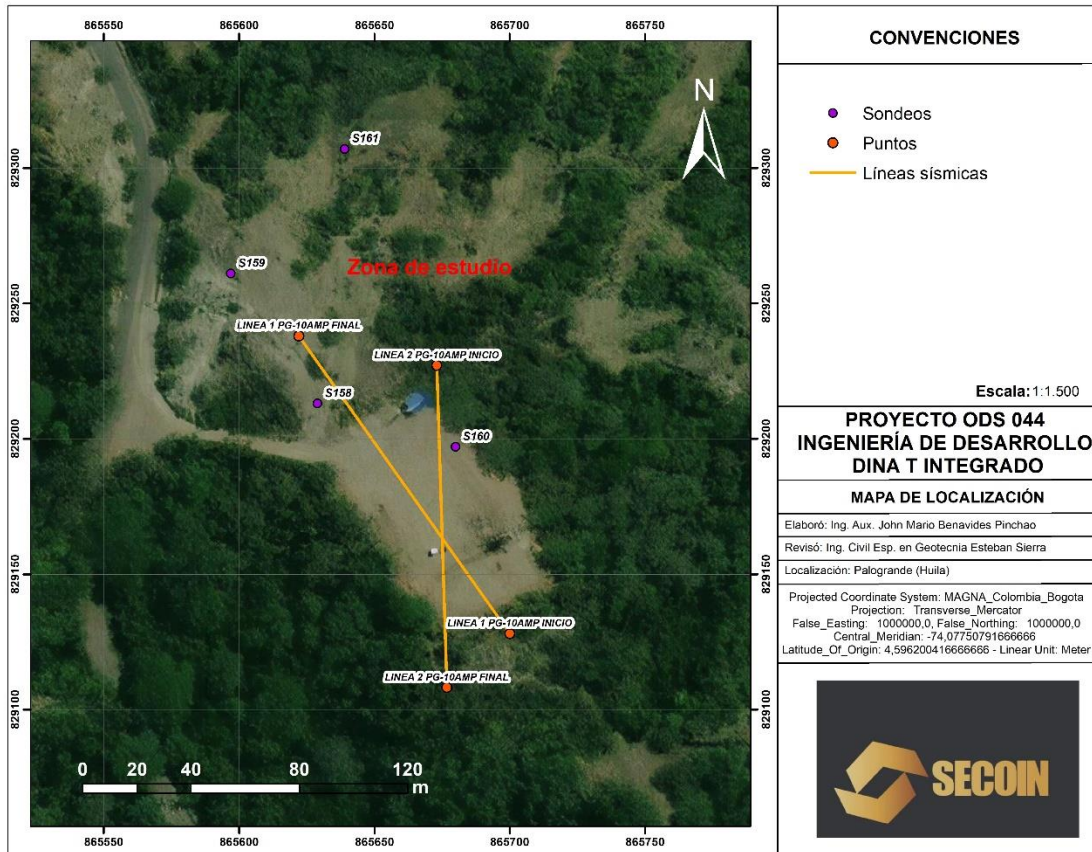


Figura 14. Localización General de la Zona, Proyecto ODS-044-PG-10AMP

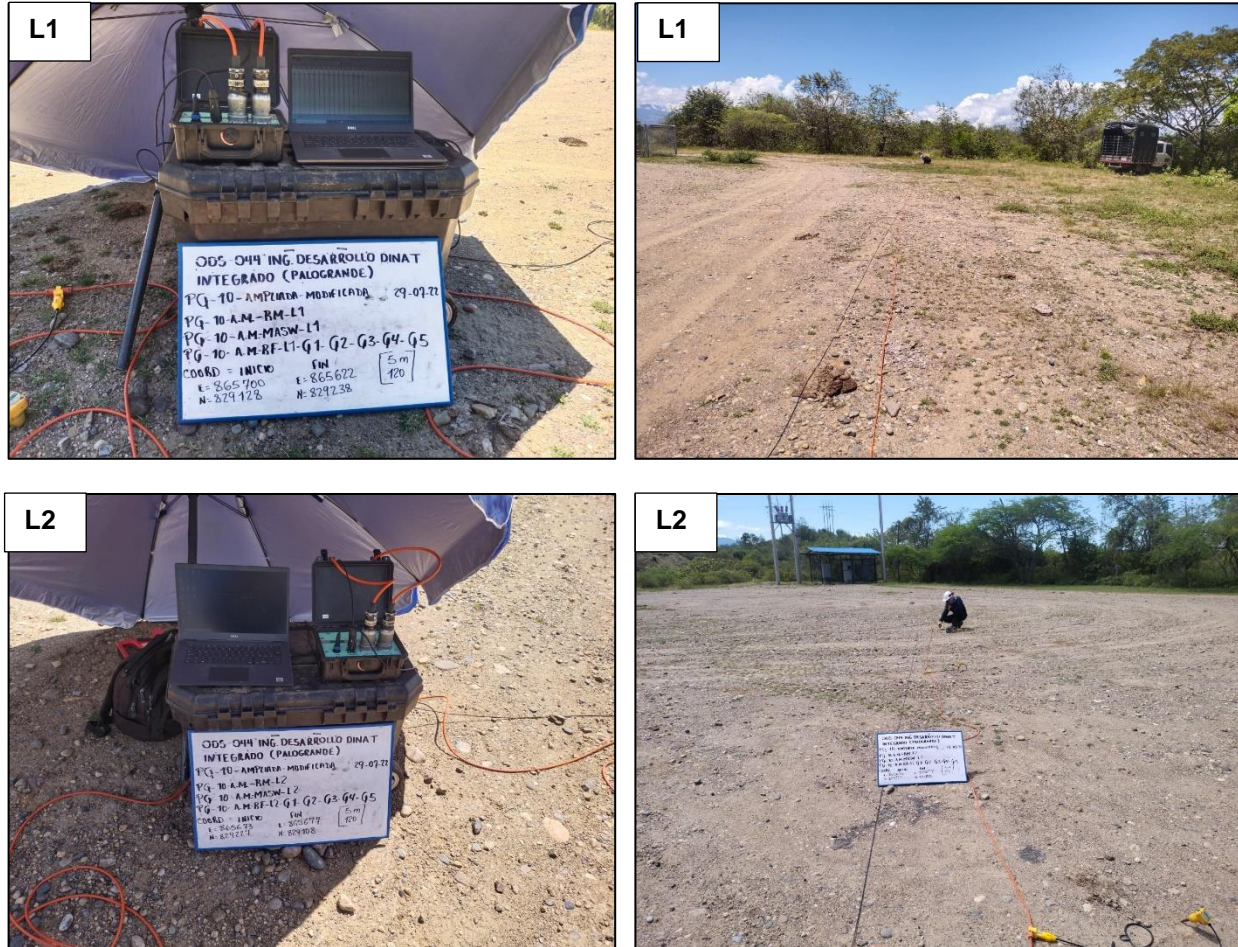


Figura 15. Registro Fotográfico.

## 6.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 REFRACCIÓN SÍSMICA.

Como resultado de la exploración geofísica adelantada, fue posible identificar la estratigrafía en función de la velocidad de onda compresional ( $V_p$ ), donde se caracterizó el perfil de suelo para la zona de influencia del proyecto.

A continuación, se presenta el resultado de la exploración geofísica, del ensayo de Refracción Sísmica.

Siguiendo los procedimientos descritos en los capítulos anteriores con la exploración realizada se obtienen los siguientes resultados.

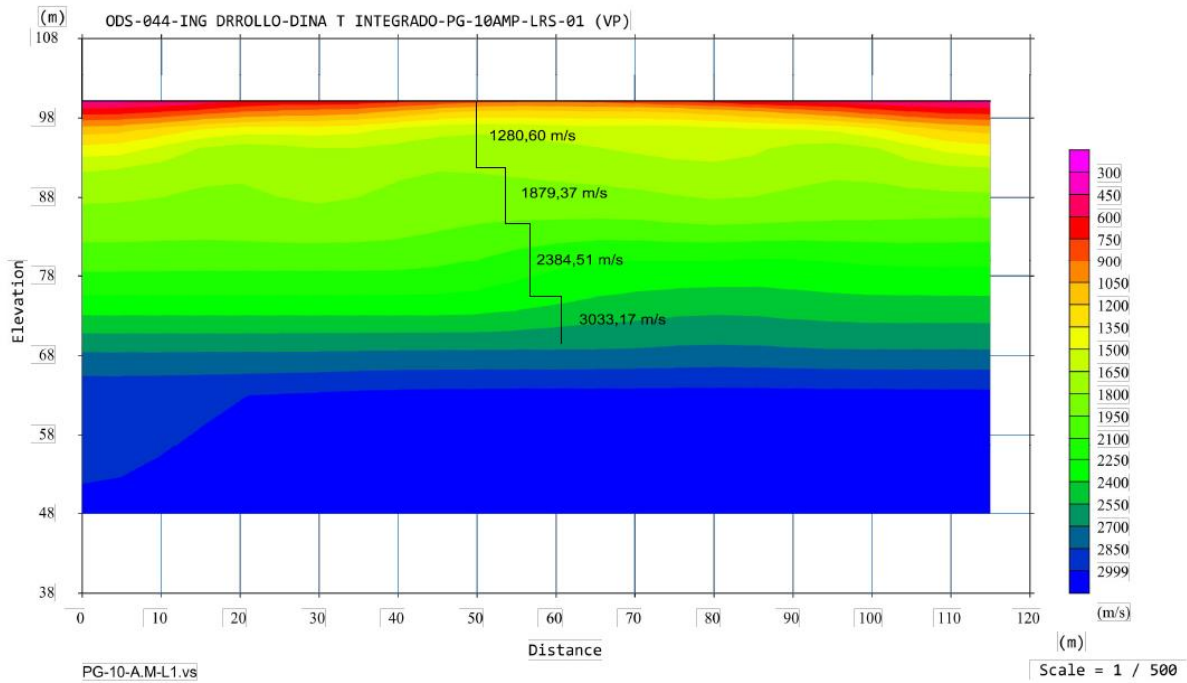


Figura 16. Perfil de Velocidad de Onda Compresional, Línea sísmica L1 ODS-044-PG-10AMP

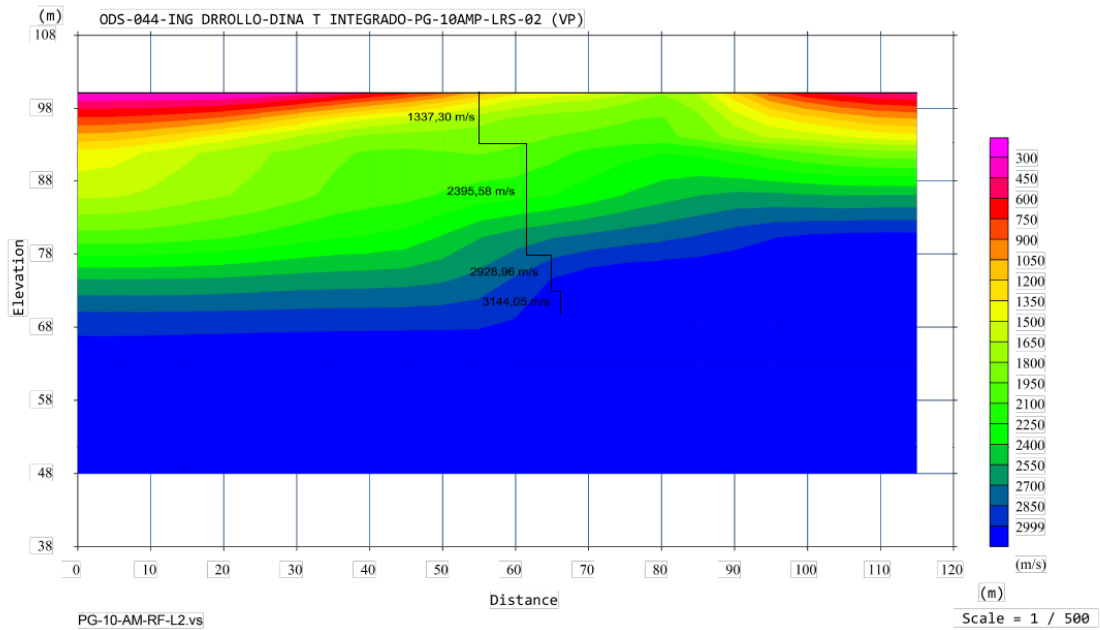


Figura 17. Perfil de Velocidad de Onda Compresional, Línea sísmica L2 ODS-044-PG-10AMP

Tabla 2. Perfil de Velocidad Promedio de Onda Compresional (Vp) Promedio.

Sitio	Línea	Profundidad (m)	Vp (m/s)
ODS-044-PG-10AMP	L1	8,00	1280,60
		15,00	1879,37
		24,00	2384,51
		30,00	3033,17
	L2	7,00	1337,30
		22,00	2395,58
		27,00	2928,96
		30,00	3144,05

## 6.2 MASW.

Siguiendo los procedimientos descritos en los capítulos anteriores con la exploración realizada se obtienen los siguientes resultados.

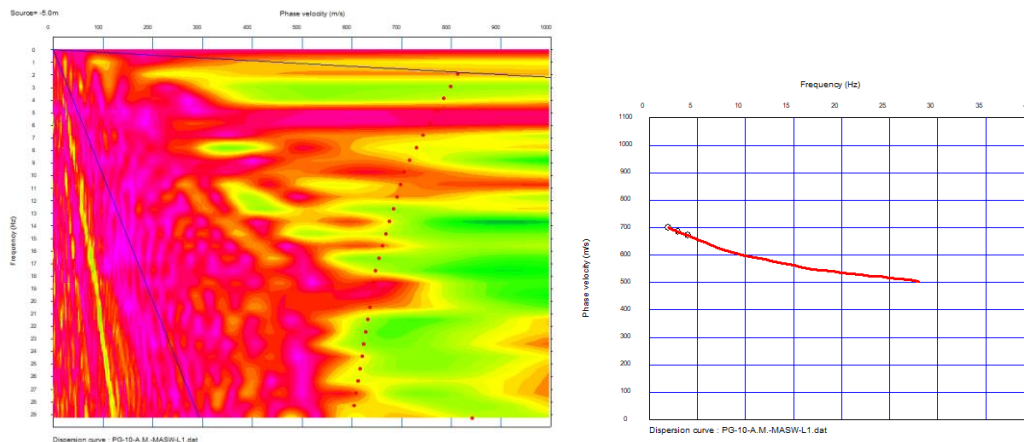
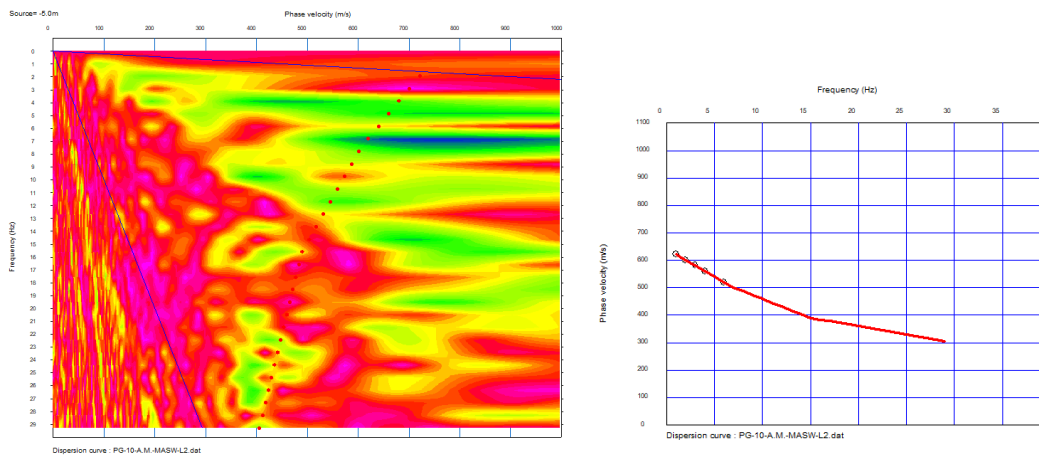


Figura 18. Imagen de Dispersión, Línea Proyecto ODS-044-PG-10AMP L1.



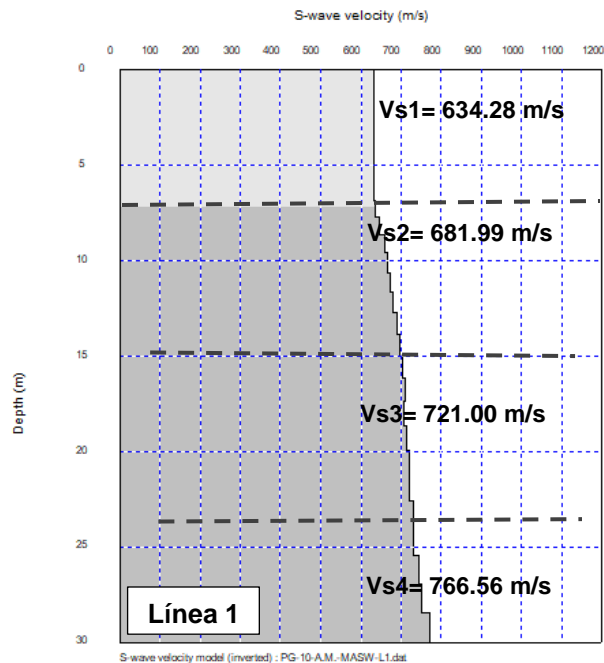
**Figura 19. Imagen de Dispersión, Línea Proyecto ODS-044-PG-10AMP L2.**

En la imagen de dispersión obtenida usando las metodologías previamente descritas, se puede apreciar que esta posee una buena resolución, permitiendo identificar el modo fundamental y el primer modo de vibración lo cual da una buena confiabilidad a los resultados obtenidos, presentando en un rango de frecuencia de 0Hz a 30 Hz y de velocidad de fase 250 m/s a 550 m/s.

Posterior a la selección de la curva de dispersión experimental, mediante la utilización de un algoritmo de búsqueda global, algoritmo genético (Dal Moro et al., 2007), se obtiene el perfil de velocidad de propagación de onda de corte en profundidad.

La profundidad de exploración obtenida en los perfiles del ensayo MASW, realizados en el Proyecto, alcanza los 30.m, esto se atribuye a la longitud de la línea en superficie, la separación de los geófonos, pero sobre todo a la rigidez del material, que permite el reconocimiento de la propagación de la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) a esa profundidad.

La selección del modelo de respuesta obedece al mejor ajuste entre el modelo teórico y el experimental obtenido de la ejecución del ensayo en campo, por tal razón, en las siguientes figuras se evidencian los rangos de iteración de la velocidad a lo largo del perfil y la selección del modelo principal (mean model) y el modelo ajustado (fittest model).



**Figura 20. Perfil de Velocidad de Onda de Corte L1.**

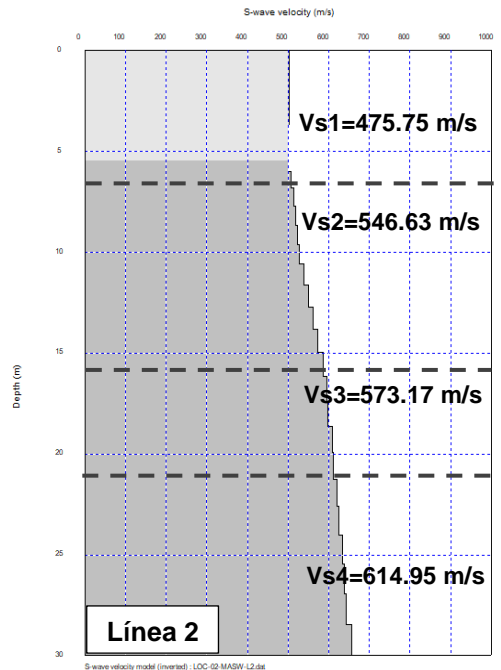


Figura 21. Perfil de Velocidad de Onda de Corte L2.

Una vez obtenido el valor de la velocidad de propagación de onda de corte en profundidad, así como los valores de densidad y relación de Poisson, aplicando los conceptos básicos de la mecánica de materiales se calculan los parámetros elásticos de los materiales del perfil estratigráfico (ver Tabla 3). Cabe resaltar que el módulo de Young E y el módulo de rigidez (G), han sido estimados para rangos de deformación muy bajos, por lo tanto, se deberá tener sumo cuidado con la utilización de estos.

Para la obtención del módulo de Poisson se aplican los criterios de mecánica de materiales en función de la velocidad de onda compresional ( $V_p$ ) medida en el ensayo de Refracción Sísmica y la velocidad de onda cortante ( $V_s$ ), obtenida del ensayo MASW- REMI.

Tabla 3. Módulo de Poisson en función de la velocidad de propagación de onda  $V_p$  y  $V_s$ .

Parámetro	Formula
Relación de Poisson	$\mu = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$
Módulo de Corte [G] (Mpa)	$G = V_s^2 * \rho$
Módulo Elástico [E] (Mpa)	$E = 2G(1 + \mu)$
Módulo Volumétrico [K] (Mpa)	$K = E/3(1 - 2\mu)$

**Tabla 4. Perfil de Velocidad de Onda Cortante (Vs) Promedio.**

Línea	Profundidad (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\mu$ Poisson	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	G (MPa)	E (MPa)	K (Mpa)
L1	8,00	634,28	1280,60	0,34	1,95	783,32	2095,33	2148,59
	15,00	681,99	1879,37	0,42	1,96	912,29	2598,53	5711,63
	24,00	721,00	2384,51	0,45	1,97	1026,68	2976,72	9860,65
	30,00	766,56	3033,17	0,47	1,98	1165,93	3418,25	16700,19
L2	7,00	475,75	1337,30	0,43	1,89	428,82	1224,33	2816,46
	19,00	543,86	2395,58	0,47	1,91	566,09	1667,50	10228,28
	27,00	573,17	2928,96	0,48	1,93	632,57	1872,52	15674,77
	30,00	614,95	3144,05	0,48	1,93	731,27	2164,73	18140,25

Los valores de densidad acá presentados corresponden a valores obtenidos en la exploración geotécnica.

Posterior a la determinación del perfil de velocidad de propagación de ondas de corte en profundidad se realiza la clasificación del perfil del subsuelo a la luz de lo estipulado en la NSR-10 en su capítulo A 2.4.1, el cual usa el criterio de la velocidad de onda cortante promedio en los primeros 30 metros, VS.30.

Se presenta el perfil esquemático de la velocidad de onda de corte (Vs) en los primeros 30.0 m de profundidad.

**Tabla 5. Perfil de Velocidad NSR-10.**

Línea	Vs (30)	Tipo de Perfil de suelo NSR-10
L1	694.49	C
L2	538.04	C

## 7.0 CONCLUSIONES

Como resultado de la exploración geofísica adelantada, fue posible identificar el perfil de velocidad de onda de corte (Vs) y onda compresional (Vp) mediante la realización de dos (2) líneas sísmicas para el proyecto, en las cuales se determinó el cambio de la velocidad en el subsuelo, reconociendo la existencia de cuatro (4) estratos principalmente, esta información se emplea como insumo para complementar el perfil de exploración de la zona de estudio en el informe geotécnico.

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio se encuentra conformada por una formación sedimentaria, la cual presenta variedades litológicas asociadas a los diferentes eventos de depositación, encontrando desde arcillas hasta conglomerados.

### Interpretación Líneas 1 y 2:

**Capa 1:** El primer horizonte, reconocido a nivel superficial en la línea 2, corresponde a un horizonte con espesor aproximado de 7,00 m, este horizonte presenta las siguientes velocidades (VpL1=1280.60 m/s) para la onda compresional y (VsL1=634.28 m/s) para la onda de corte. Estas velocidades se asocian con la presencia de suelos meteorizados o erosionados a nivel superficial con presencia de materia orgánica.

**Capa 2:** El Segundo horizonte explorado, se identificó en las dos líneas sísmicas. En la línea 1 a partir de 7,00 m hasta 15,00 m y en la línea 2 desde 16,00 m hasta 19,00 m de profundidad. De acuerdo con el resultado de las velocidades obtenidas en el ensayo geofísico se atribuye este horizonte al basamento sedimentario meteorizado, caracterizado por las siguientes velocidades: (VpL1=1879.37 m/s | VpL2=2395.58 m/s) y (VsL1=681.99 m/s | VsL2=543.86 m/s).

**Capa 3:** El tercer horizonte explorado se identificó en las dos líneas sísmicas. Para la línea 1 a partir de los 14,00 m hasta 24,00 m de profundidad y para la línea 2 hasta los 27,00 m explorados. El incremento considerable en las velocidades de este horizonte se asocia probablemente al basamento sedimentario poco meteorizado, las velocidades obtenidas son (VpL1= 2384.51 m/s | VpL2=2928.96 m/s) y (VsL1=721.0 m/s | VsL2=573.17 m/s).

Con los datos obtenidos de la velocidad, no es posible asociar o identificar la presencia del nivel freático.

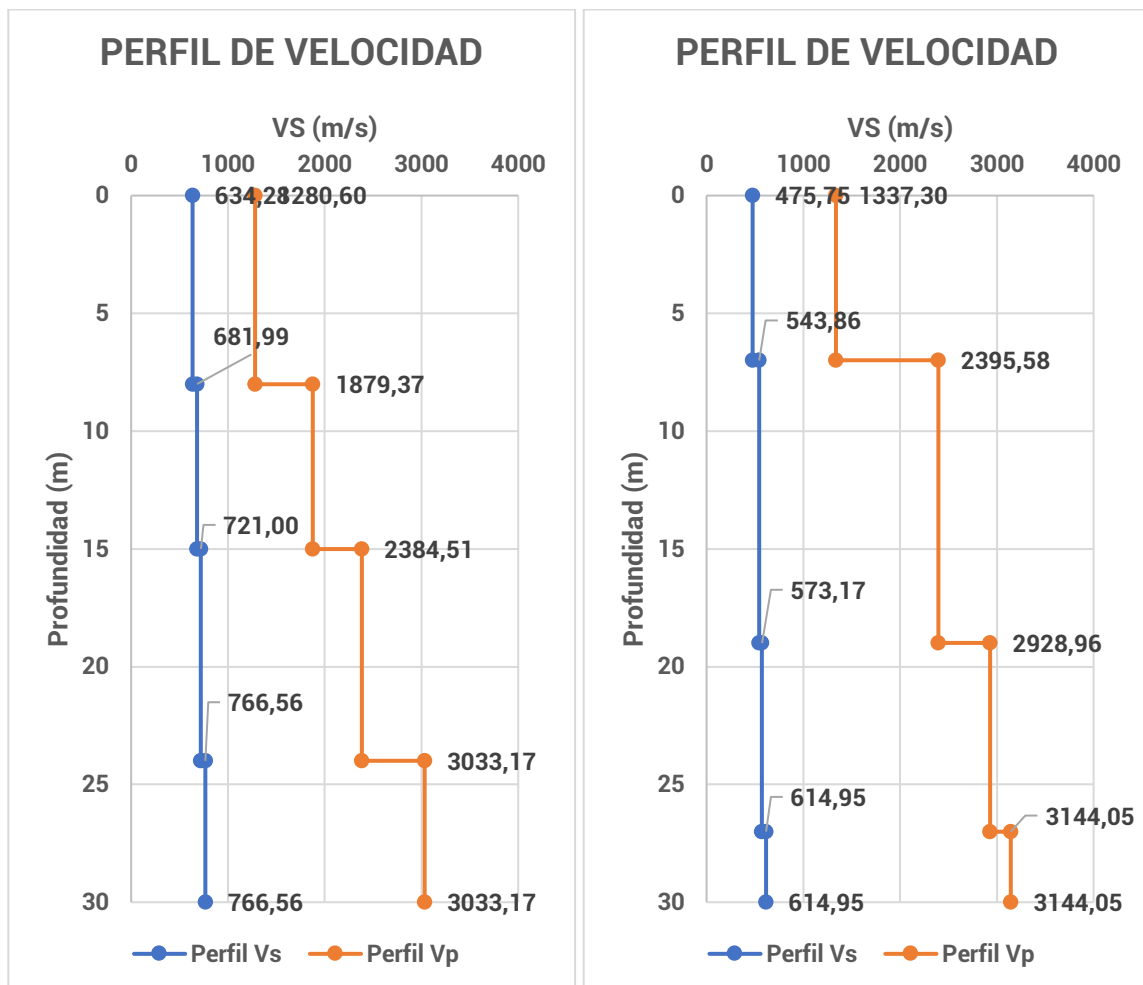


Figura 22. Comparación de velocidades y capas LOCACIÓN 2

<b>INGENIERÍA DESARROLLO INTEGRADO CAMPO DINA T Y PALOGRANDE, CEBÚ, PIJAO</b>	ECP-USU-21170-GPA-IC01-0- GEN-IF-007-P  <b>Documento No.</b>
<b>INFORME EXPLORACIÓN GEOFÍSICA</b>	<b>Revisión: P</b>

Los parámetros elásticos del subsuelo aquí presentados tales como el módulo de Young (E) y el módulo de rigidez (G), han sido calculados para rangos de deformación mínimos del orden de  $1 \times 10^{-4}$ , es decir estos parámetros corresponden a G-Max y E-Max, por lo tanto, será responsabilidad del consultor el uso adecuado de estos.

## 8.0 BIBLIOGRAFÍA.

- Bruce B. Redpath, (1973) Seismic refraction Exploration for Engineering Site Investigations.
- Beaty, K.S., Schmitt, D.R., and Sacchi, M. (2002). Simulated annealing inversion of multimode Rayleigh wave dispersion curves for geological structure. *Geophys. J. Int.* 151, 622–631.
- Degrande, G., Badsar, S.A., Lombaert, G., Schevenels, M., and Teughels, A. (2008). Application of the Coupled Local Minimizers method to the optimization problem in the Spectral Analysis of Surface Waves method. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 134, 1541–1553.
- Foti, S. (2000). Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves. Politecnico di Torino.
- Foti, S. (2003). Small-strain stiffness and damping ratio of Pisa clay from surface wave tests. *Geotechnique* 53, 455–461.
- Gabriels, P., Snieder, R., and Nolet, G. (1987). In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves. *Geophys. Prospect.* 35, 187–196.
- Gardner, J.M., Marosi, K.T., and Hiltunen, D.R. (2009). Detailing of a systematic protocol for surface wave inversion. *Contemp. Top. Situ Test. Anal. Reliab. Found.* 186, 66–73.
- Louie, J.N. (2001). Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 91, 347–364.
- McMechan, G.A., and Yedlin, M.J. (1981). Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics* 46, 869–874.
- Dal Moro, G., Pipan, M., Forte, E., and Finetti, I. (2003). Determination of Rayleigh wave dispersion curves for near surface applications in unconsolidated sediments. In 2003 SEG Annual Meeting,.
- Dal Moro, G., Pipan, M., and Gabrielli, P. (2007). Rayleigh wave dispersion curve inversion via genetic algorithms and marginal posterior probability density estimation. *J. Appl. Geophys.* 61, 39–55.
- Nazarian, S., Stokoe, I.I., and Hudson, W.R. (1983). Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems. *Transp. Res. Rec.*

<b>INGENIERÍA DESARROLLO INTEGRADO CAMPO DINA T Y PALOGRANDE, CEBÚ, PIJAO</b>	ECP-USU-21170-GPA-IC01-0- GEN-IF-007-P <b>Documento No.</b>
<b>INFORME EXPLORACIÓN GEOFÍSICA</b>	<b>Revisión: P</b>

- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. In SEG Expanded Abstracts, pp. 1377–1380.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. Geophysics 64, 800–808.