

## ARTICULOS ORIGINALES

### INGENIERÍA DE MINAS GEOLOGÍA Y CIVIL

#### CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DEL PREDIO DE ING. CIVIL-CIUDAD UNIVERSITARIA-UNSCH

**Angel H. Vilchez Peña, Saúl W. Retamozo Fernández**

Unidad de Investigación e Innovación de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Programa de Ingeniería Civil - Área: Geotecnia

E-mail: angel.vilchez@unsch.edu.pe

#### RESUMEN

El empleo de estudios geofísicos como medio indirecto para determinar señales desde una fuente sísmica han sido desarrollados desde el año 1970, los mismos que en la actualidad, han evolucionado en la determinación de Velocidades de Onda  $V_p$  y de secundaria  $V_{s30}$ . Ambas velocidades nos sirvieron para la comparación del rango de valores establecidos por el Código (ASCE/SEI 7-05) y las Normas ASTM D5777 y E-030 Sismorresistente, así como la descripción de los materiales de suelos. Para la caracterización de los materiales del pabellón de Ingeniería civil a profundidades máximas de 30m entre suelos y rocas se ha propuesto un trabajo de campo considerando la metodología de ensayos geofísicos activos de 05 líneas de refracción sísmica (LRS) y 05 ensayos multicanal MASW; con los cuales se obtuvieron módulos de deformación (E) y módulos de corte (G) y clasificándolos como suelos intermedios **S2** según la norma sismorresistente peruana. Los resultados de los procedimientos geofísicos en el predio de Ingeniería civil mencionan una formación estratigráfica de 03 estratos formados por suelos areno limosos y gravosos de compacidad densa con velocidades de onda  $V_p$  entre 300 a 1000 m/s y  $V_{s30}$  entre 380 a 490 m/s, respectivamente. Es recomendable que ensayos geofísicos indirectos sean fortalecidos con estudios complementarios de Mecánica de suelos empleando exploraciones a cielo abierto y comparando condiciones del subsuelo. Criterios relacionados con los resultados del presente estudio, no podrán ser utilizados de manera similar sino como referencia.

Palabras clave: Velocidades de onda, geofísico, medio indirecto, sismorresistente, ensayos multicanal, módulos de deformación. Módulos de corte, refracción sísmica.

#### GEOPHYSICAL CHARACTERIZATION OF THE ING. CIVIL-CIUDAD UNIVERSITARIA-UNSCH

#### ABSTRACT

The use of geophysical studies as an indirect means to determine signals from a seismic source have been developed since 1970, the same as today, have evolved in the determination of Wave velocities  $V_p$  and secondary  $V_{s30}$ . Both speeds were used to compare the range of values established by the Code (ASCE / SEI 7-05) and ASTM D5777 and E-030 Seismic resistant standards, as well as the description of the flooring materials. For the characterization of the materials of the Civil Engineering pavilion at maximum depths of 30m between soils and rocks, a field work has been proposed considering the methodology of active geophysical tests of 05 seismic refraction lines (LRS) and 05 multichannel MASW tests; with which deformation modules (E) and shear modules (G) were obtained and classified as intermediate soils S2 according to the Peruvian seismic resistant standard. The results of the geophysical procedures on the Civil Engineering site mention a stratigraphy formation of 03 strata formed by silty and heavy sandy soils of dense compactness with wave speeds  $V_p$  between 300 to 1000 m / s and  $V_{s30}$  between 380 to 490 m / s, respectively. It is recommended that indirect geophysical tests be strengthened with complementary studies of Soil Mechanics using open-pit explorations and comparing subsoil conditions. Criteria related to the results of this study may not be used in a similar way but as a reference.

Keywords: Wave velocities, geophysical, indirect medium, earthquake resistant, multichannel tests, deformation moduli. shear modules, seismic refraction.

## INTRODUCCIÓN

La exploración geofísica comprende una amplia gama de disciplinas entre las que se pueden mencionar: geología, física, química y los sistemas integrados como electrónica.

En la zona de Ayacucho, no se presenta estudios relacionados con la geofísica, por ello se propuso caracterizar los suelos de la Ciudad Universitaria con énfasis en el pabellón AR de Ingeniería Civil, para lo cual se proyectó líneas de refracción sísmica y líneas de análisis multicanales en las inmediaciones de la zona de estudio.

Según investigaciones como el código (ASCE/SEI 7-05), Norma ASTM D 5777 y Norma E-030 Sismorresistente, manifiestan rango de valores en las cuales se describen materiales de suelos y rocas de manera aproximada, esto sea complementado con estudios geológicos y geotécnicos. De esta manera los resultados obtenidos de velocidades  $V_p$  y  $V_{s30}$  serán utilizados en la caracterización geofísica de suelos en la ciudad universitaria, así mismo se llegará a proponer módulos de resistencia de deformación (E) y módulo de corte (G) respectivamente.

Para un mejor desarrollo de proyecto se iniciará los trabajos de campo mediante una calibración de los equipos, considerando una Línea de refracción sísmica (LRS) con fines de comparar resultados y de maniobrar los equipos. Con el fin de encontrar valores aceptables se realizarán varias líneas de refracción y MASW; y se comparan con los valores de las normas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La prospección geofísica es definida como una metodología para la deducción de las condiciones del subsuelo a través de la observación de fenómenos físicos (naturales o artificiales) relacionados con la estructura geológica del subsuelo. Originalmente fue desarrollada como un método efectivo para la prospección del petróleo y otros depósitos de minerales. Después de la segunda guerra mundial se empieza utilizar para el estudio de terrenos en zonas montañosas (rocosos) para la construcción de represas y túneles. Posteriormente, en la década 1970, se utiliza para el estudio de suelos blandos, en áreas con suelos de origen aluvial y sedimentario. Actualmente es empleada en investigaciones para la determinación de la estructura geológica superficial de los suelos.

Entre los Métodos Geofísicos más utilizados en la actualidad se pueden citar:

- ⇒ Método Gravimétrico
- ⇒ Método Magnético.
- ⇒ Método Eléctrico.
- ⇒ Métodos Sísmicos.

### 1. Métodos Sísmicos

Se basan en la medición de variaciones de velocidad de propagación de ondas de choque, producidas de forma natural (sismos) o artificial (por un impacto en el suelo o por una explosión), con los cuales se puede obtener una imagen aproximada de la estratigrafía del terreno. Las propiedades elásticas de los materiales que componen el subsuelo y sus efectos en la propagación de ondas sísmicas son fundamentales para la caracterización geotécnica de un sitio (Xia et al., 1999). Dentro de estas propiedades, uno de los parámetros clave es el perfil de velocidades de ondas de corte, dado que permite la evaluación primaria de la respuesta dinámica de un sitio (Tokimatsu, 1997). Existen métodos que permiten determinar estas propiedades directamente, los cuales pueden ser de carácter invasivo o no-invasivo. Los primeros requieren de una o varias perforaciones (métodos in-hole) en el sitio estudiado, los cuales, en muchas ocasiones, no se pueden llevar a cabo, debido a problemas de costo o espacio. Otros métodos, como la refracción sísmica, se realizan en la superficie, pero requieren establecer muchos supuestos, que pueden alejarse de la realidad, y no permiten explorar intercalaciones de suelos blandos bajo suelos rígidos. Por otro lado, se encuentran los métodos basados en el registro de ondas superficiales, los cuales agregan un grado de incertidumbre al no determinar directamente las propiedades elásticas buscadas, pero permiten explorar el suelo a grandes profundidades, siendo más eficientes en costo y tiempo. Los métodos sísmicos más utilizados son: Método Up-Hole, Down-Hole y Cross-hole; Método de Medición de Ondas Superficiales MASW y SASW; Método de Reflexión y Refracción Sísmica; los cuales se fundamentan en la teoría de ondas.

## 2. Sísmicos Activos

Los métodos sísmicos activos se caracterizan por el uso de una fuente sísmica artificial (p.e. una maza). Esta idea asociada a las investigaciones de campo publicadas por Robert Mallet en el año de 1846 en su artículo sobre “La dinámica de los terremotos”, en donde propuso la idea de generar terremotos artificiales por medio de explosiones controladas mediante el empleo de cartuchos de pólvora. Mallet concluyó que a cada tipo de roca se le asocia una velocidad de propagación de ondas sísmicas, con lo cual sería posible la clasificación de los estratos del terreno en base a las características que presentan dichas velocidades de propagación. El procedimiento seguido en la actualidad para el registro de ondas sísmicas utilizando los métodos activos no está muy lejos de la idea que planteo Mallet, hace casi 170 años. Este procedimiento consiste, generalmente, en desplegar sobre superficie del suelo un dispositivo formado por geófonos y medir las llegadas de las ondas sísmicas, las cuales han sido previamente generadas por una fuente sísmica artificial. La profundidad que se alcance con estos métodos dependerá de la fuente sísmica que se utilice para generar las ondas, de las características de las capas que componen el terreno y de los geófonos utilizados. Así, por ejemplo, geófonos de menor frecuencia facilitan una mayor profundidad de investigación para un mismo emplazamiento al poder registrar ondas sísmicas de menor frecuencia, las cuales están relacionadas a las capas más profundas. Los métodos sísmicos activos más importantes son:

## 3. Método de Refracción Sísmica

El método de refracción sísmica está basado en las trayectorias de tiempo mínimo que emplean las ondas sísmicas al propagarse desde un punto de la superficie, en donde son generadas, hasta los diferentes horizontes refractores del subsuelo y de estos hasta otro punto, ubicado en la superficie, en donde las señales son detectadas por una serie de sensores o geófonos, distribuidos usualmente a lo largo de una línea recta orientada hacia la fuente (Figura 8). Dichas señales son transmitidas por un cable hasta el sismógrafo, que amplifica, filtra y registra las señales de manera digital en un sismograma (Ruiz et al., 1993). A partir de la observación, procesamiento y análisis de los sismogramas es posible construir graficas de tiempo-distancia, las mismas que mediante el análisis y procesamiento adecuados permiten determinar el número de capas en el subsuelo, sus espesores, geometría de la superficie refractante y velocidad de propagación a través de los distintos medios. Actualmente el método ha encontrado una gran variedad de aplicaciones en la exploración de objetivos someros como por ejemplo en la detección de túneles y cavidades, determinación de los niveles freáticos y módulos de elasticidad del suelo y de la roca. Sin embargo, el método aún se utiliza en la exploración petrolera para determinar la velocidad de la capa intemperizada, la profundidad de los estratos, así como del basamento Figura 1.

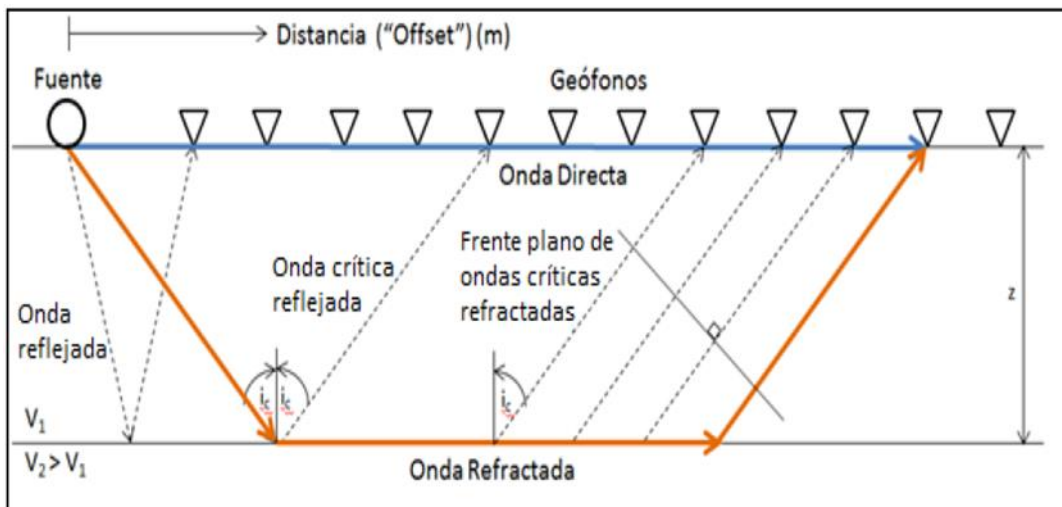


Figura 1.- Esquema de un ensayo de Refracción Sísmica.

### 3.1. Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

Este método utiliza la dispersión de las ondas Rayleigh, que solamente toma dos tercios del total de la energía sísmica generada por el impacto de una fuente sobre la superficie, lo que indica una facilidad relativa de la medición en campo y de la adquisición de datos, por lo que se le considera muy útil. Sin embargo, los inconvenientes pueden aparecer al igual que en todos los otros métodos sísmicos. Por ejemplo, la fuente genera ondas de cuerpo, tipos elevados de ondas Rayleigh, sonidos ambientales aleatorios y arribos de ondas

coherentes de objetos superficiales, los cuales interfieren con la señal, ya que el modelo básico de las ondas Rayleigh es propagarse directamente desde la fuente. El Método Sísmico de Multi- Canales (MASW por sus siglas en Inglés) usa diferentes cantidades de receptores extendidos en modelos lineales, espaciados a distancias iguales y conectadas a un canal individual de registro. La realización de una medición en campo consiste en la obtención de múltiples registros de ondas a diferentes distancias de la ubicación de la fuente que las genera. La forma básica de campo para la configuración y adquisición de datos del método (MASW) es similar a la que se usa en la medición de reflexión de un punto común de profundidad. Por esta similitud, el método (MASW) puede ser aplicado a una reflexión o refracción, si son utilizados receptores de baja frecuencia, Figura 2.

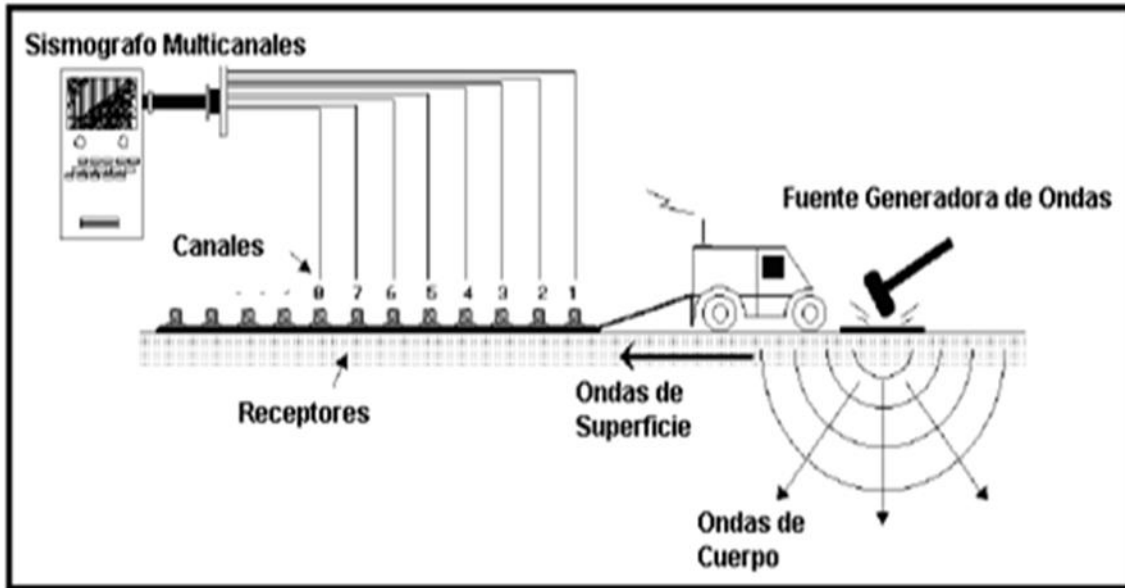


Figura 2.- Configuraciones típicas del método SASW (Foti, 2000)

### 3.2 Estimación de Parámetros Elásticos

El Modulo de corte del suelo (G) es variable y decrece en función, principalmente, del Incremento de las deformaciones de corte en el suelo. El módulo de corte máximo (G<sub>máx</sub>) asociado a pequeñas deformaciones puede ser determinado mediante la velocidad de propagación de las Ondas de Corte (V<sub>s</sub>), las cuales se obtuvieron mediante ensayos geofísicos realizados. Se ha demostrado que valores de G<sub>máx</sub> (o valores de E<sub>máx</sub>) factorados pueden ser de utilidad para evaluar los asentamientos de las cimentaciones (Fahey y Carter, 1993; Mayne, 2001).

Relacionando las velocidades de ondas de corte, ondas de compresión y la densidad de los materiales por donde se propagan las ondas se pueden obtener los siguientes parámetros dinámicos:

**Coefficiente de Poisson (μ):**

$$\mu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

**Módulo de Young (E<sub>d</sub>):**

$$E_d = 2.G. (1 + \mu)$$

**Módulo de Corte (G<sub>máx</sub>):**

$$G_{máx} = \gamma . V_s^2$$

$$\text{Siendo: } G = 0.1.G_{máx}$$

#### 4. Metodos usados para la Caracterizacion Geofisica del Predio de la UNSCH

En el presente capitulo se describe la metodología de adquisición y procesamiento utilizado para los métodos de refracción sísmica y de ondas superficiales MASW, dichos ensayos se realizaron en los módulos de la ciudad Universitaria en el pabellón de la escuela profesional de Ingeniería Civil AR.

##### 4.1. Descripción del área de estudio

El pabellón de la escuela profesional de Ingeniería Civil AR, se encuentra en los módulos de la ciudad Universitaria, en el distrito de Ayacucho, Provincia de Huamanga y Departamento de Ayacucho. La zona en estudio está conformada en su mayoría por terrenos compuestos de un estrato orgánico por alteración de meteorización física, así mismo los suelos naturales por debajo son clasificados como suelos limosos con alto grado de sales (caliche), depositados sobre materiales de afluentes de ríos, los cuales son considerados en depósitos de la formación Ayacucho.

La zona en estudio se encuentra en la zona de sierra y cuyas precipitaciones se dan en los meses de mediados de octubre a inicios de abril con el 80 % de la precipitación anual y el resto del año con un 20 % de la precipitación anual. El promedio anual de precipitaciones es de 19.5mm datos se obtuvieron de la información del estudio suelos realizado para la construcción del nuevo Pabellón de la escuela profesional de Ingeniería Civil AR. Asimismo presenta un clima seco y templado, cuya temperatura promedio anual es de 15°C.Figura 3.



Figura 3.- Ubicación del pabellón de la E.P. de Ingeniería Civil AR dentro de los módulos de la ciudad Universitaria.

##### 4.2. Esquema del proceso de los trabajos de campo

Para el desarrollo de la presente investigación, se planteó el siguiente esquema y secuencia de trabajo, observado en la Figura 4.



Figura 4.- Diagrama de secuencia de investigación.

**Fase 1. Revisión y recopilación de material bibliográfico.** Esta etapa consistió en investigar y revisar información bibliográfica de los trabajos más influyentes e importantes de ruido sísmico ambiental y método de Nakamura, así como de la zona de estudio, y de los distintos métodos geofísicos previos realizados en la zona con objetivos similares a los de esta investigación, incluyendo la geología del área.

**Fase 2. Organización y planificación de campo.** El área de estudio se encuentra ubicada los ambientes de la ciudad universitaria UNSCH (pabellón de la escuela profesional de Ingeniería Civil AR), tal como muestra la Figura 5, es decir LRS-01 distancia de 75 m, LRS-02 de 75 m, LRS-03 de 75 m, LRS-04 de 75 m y LRS-05 de 75 m es decir 05 estaciones o líneas sísmicas.

**Fase 3. Etapa de adquisición.** La adquisición de los datos consistió en un trabajo de campo durante los meses de octubre a diciembre del 2019, con una duración de 15 días. La logística de trabajo consistirá en realizar 05 estaciones y empleando el equipo siguiente:

#### 4.3. Calibración de una línea geofísica (LS-01) en la zona del pabellón de la escuela profesional de Ingeniería Civil AR

Con fines de calibrar el equipo de Refracción sísmica se ha considerado realizar una línea sísmica en la zona del Pabellón de la Escuela de Ingeniería Civil para el tendido de la Línea sísmica (LRS-01) y luego para interpretar resultados.



Figura 5. Proceso de calibración del equipo de refracción sísmica y estimulación de la fuente con presencia del colaborador de la investigación

- ✓ Luego de completar el tendido de la línea sísmica, se procede a generar señales sísmicas mediante la excitación del medio a través de golpes sobre un plato metálico.
- ✓ La fuente de energía utilizada para generar las ondas sísmicas depende de la profundidad de investigación, para líneas menores de 100 m, una comba de 20 lbs. permite obtener registros de ondas con la adecuada nitidez.



Figura 6.- Proceso de calibración del equipo de refracción sísmica y estimulación de la fuente con presencia del colaborador de la investigación.

#### **4.4. Aplicación de las líneas sísmicas en el área de estudio**

- LINEA SISMICA N°1 (LRS-01), ubicada entre las áreas de estructuras y laboratorio de mecánica de suelos.
- LINEA SISMICA N°2 (LRS-02), ubicada entre las áreas de mecánica de suelos y laboratorio de topografía
- LINEA SISMICA N°3 (LRS-03), atraviesa la glorieta de la EP. Ing. Civil, Pabellón AR
- LINEA SISMICA N°4 (LRS-04), ubicada en el frontis del pabellón AR
- LINEA SISMICA N°5 (LRS-05), ubicada en el lado derecho de la EP. Ing. Civil

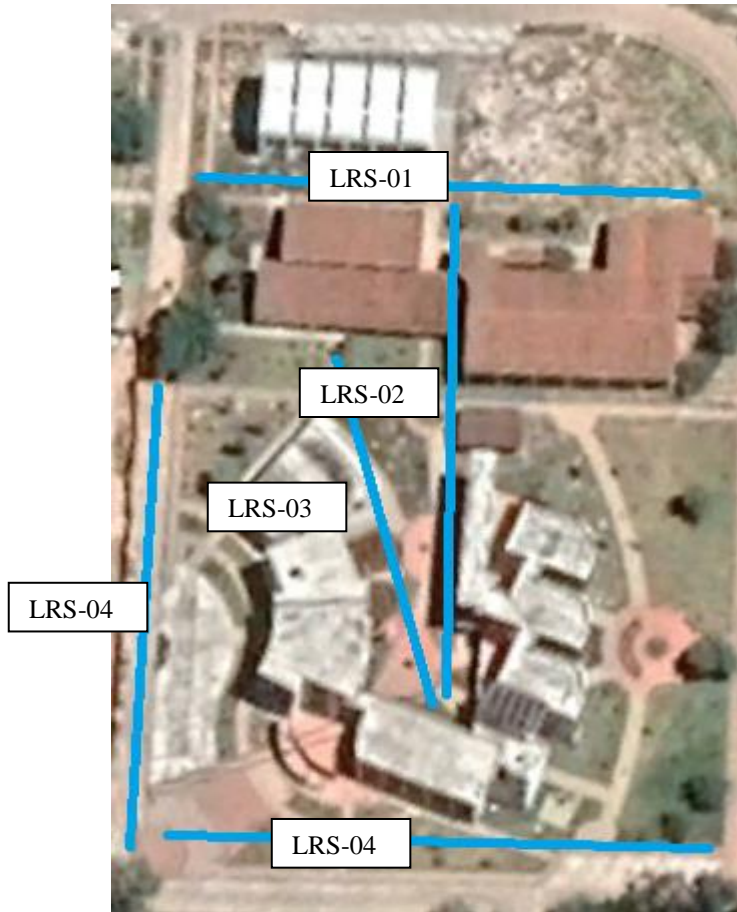


Figura 7. Ubicación de las líneas de tendido sísmico (LRS) para el ensayo correspondiente.

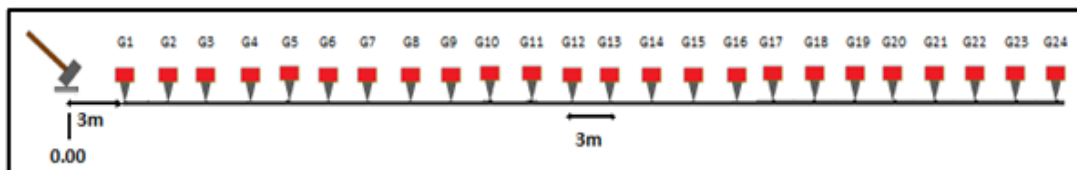


Figura 8. Disposición de geófonos para cada línea de tendido sísmico

- ⇒ El cable de conexión de los geófonos se tiende y debe ser puesto fuera de la línea de geófonos a lo largo de la línea de tendido se recomienda su ubicación al lado opuesto de la ubicación del sismógrafo (para este caso lado derecho) y a este cable van conectados todos los geófonos.
- ⇒ El cable de extensión del dissipador o trigger se despliega paralelo al tendido de los geófonos, este cable debe evitar el cruce con el cable de los geófonos preferentemente se recomienda colocar este cable al lado opuesto de la ubicación de la línea de geófonos tal como se muestra en la Figura 9.



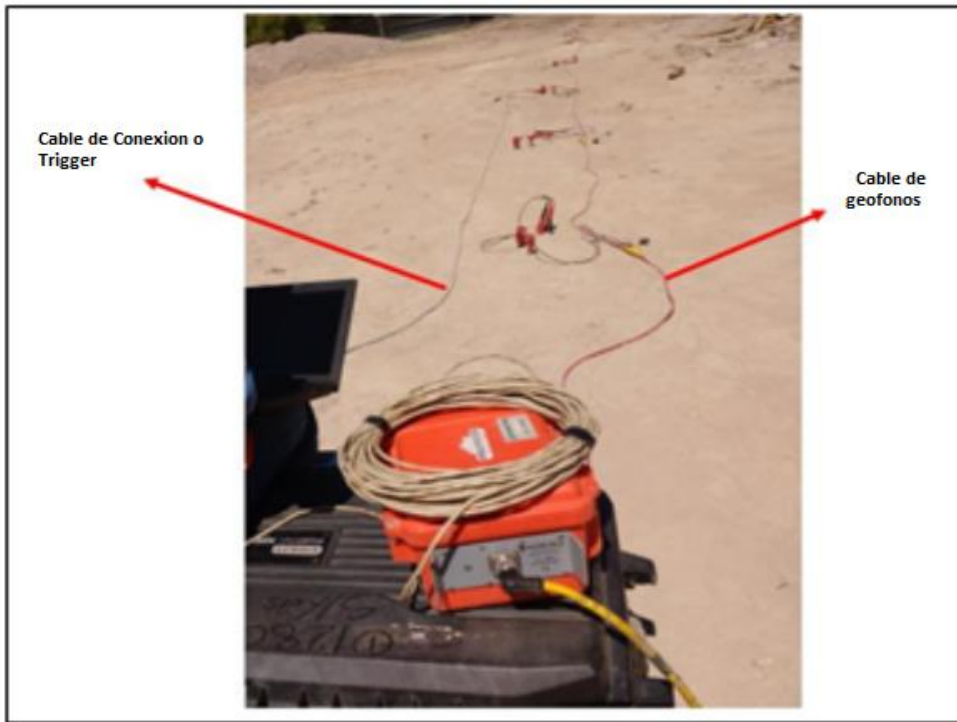


Figura 9. Disposición de geófonos para línea de tendido sísmico.



Figura 10. Equipos debidamente conectados y el registro de datos en la PC.

#### 4.5. Metodología de adquisición de datos para el método MASW

La adquisición de los datos en campo para el método MASW constante de 5 líneas de tendido sísmico al igual que el método anteriormente descrito, para este método se hizo uso de los geófonos de 4.5 Hz y los pasos que se siguieron fueron los siguientes:

⇒ Se realiza la instalación de los equipos tal como se mencionó anteriormente pero cambiando los geófonos de 10 Hz a 4.5 Hz. Así mismo en este ensayo se tienen más puntos para realizar los golpes de martillo que vienen siendo 6 shots por línea de tendido sísmico, aumentando estos al inicio y final de cada línea de tendido.

⇒ El primer shot se realiza 28 m del geófono 1 (G1), el segundo shot se realizó a 14m del G1, el tercer shot se ubica 7m del G1, el cuarto a 7 metros del geófono 24 (G24), el quinto a 14m del G24 y el sexto shot se ubica descrito se muestra en la Figura 11.

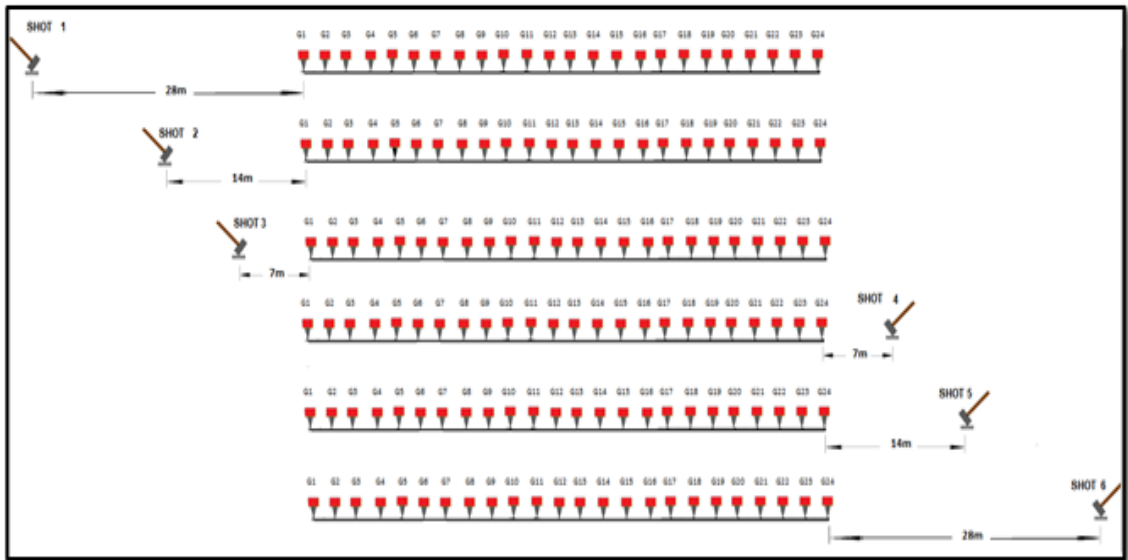


Figura 11.- Ubicación de los 6 shots por Línea para el método de MASW.

**4.6. Procesamiento de los Datos del método de Refracción sísmica**

Para realizar el procesamiento de las ondas refractadas fueron utilizados los programas de procesamiento PICKWIN versión 4.2.0.0 y PLOTREFA versión 2.8.0.1 del paquete de procesamiento SeisImager, con el objetivo de obtener diferentes parámetros físicos tales como: velocidades de las ondas P y los diferentes estratos por los que está compuesto el terreno y la profundidad (h) de la interface de las diversas capas, así como también obtener una tomografía del subsuelo a lo largo del perfil, para ello se mostrará a continuación paso a paso la manera en que se fueron procesando los datos para cada línea de tendido. Cabe mencionar que durante el ensayo se realizaron 5 shots tal como se menciona en la toma de datos sin embargo para el procesamiento de datos se tomaron 3 que son los datos de los extremos (shot 1 y shot 5) y el punto central (shot 3) a continuación se presentará el proceso para la línea de tendido N°01.

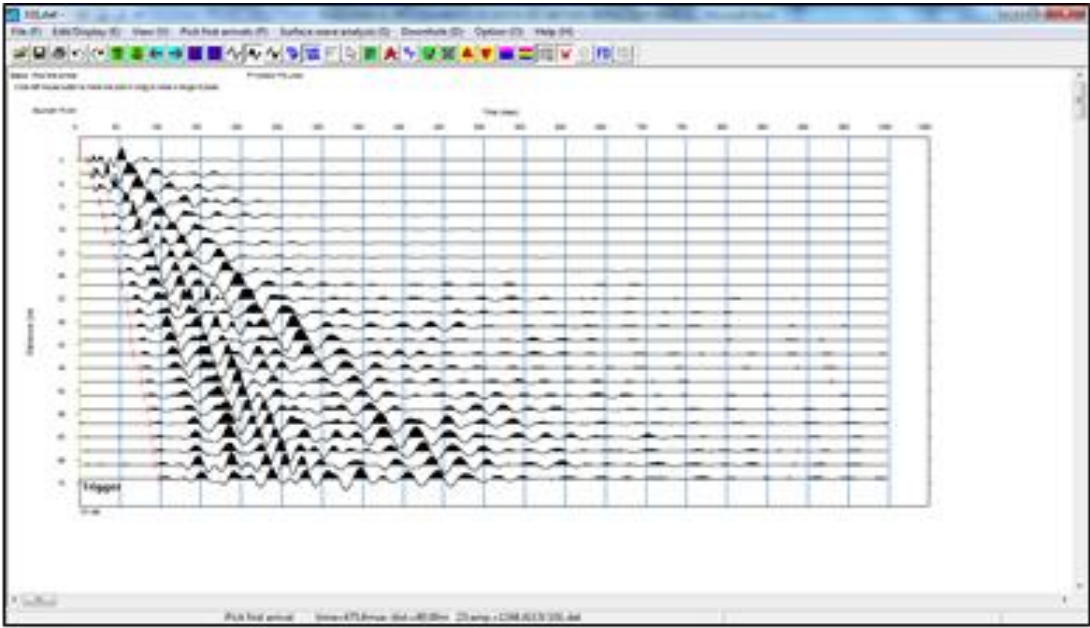


Figura 12. Ventana muestra registro sísmico y ubicación de primeros arribos de ondas P a cada geófono.

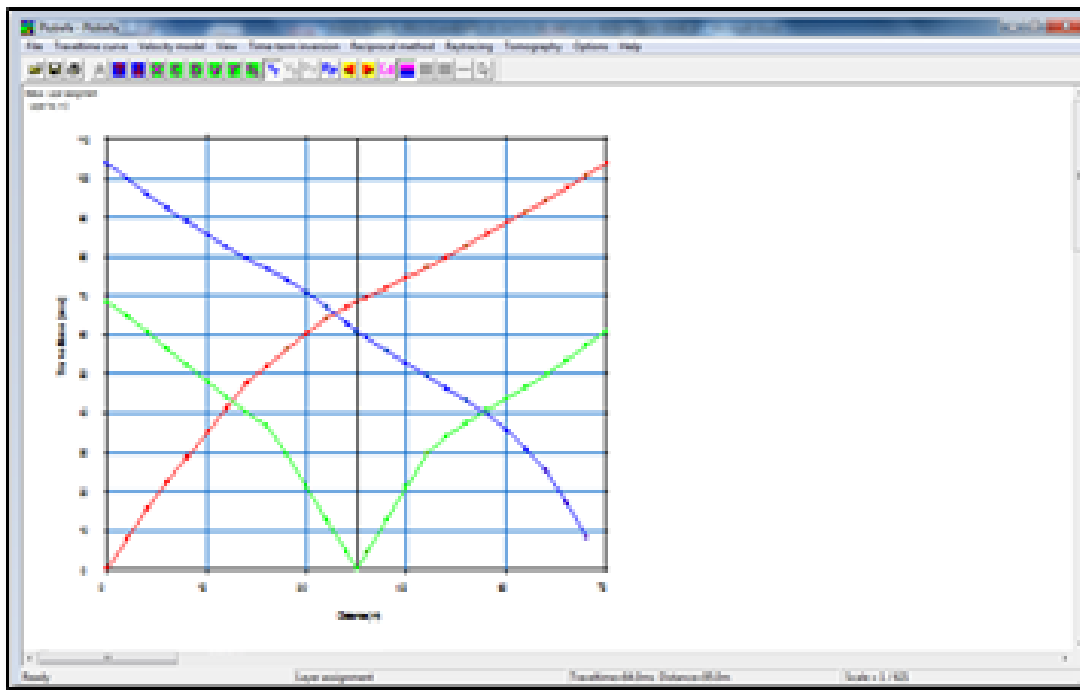


Figura 12. Ventana muestra las Domocrónicas de los 5 registros

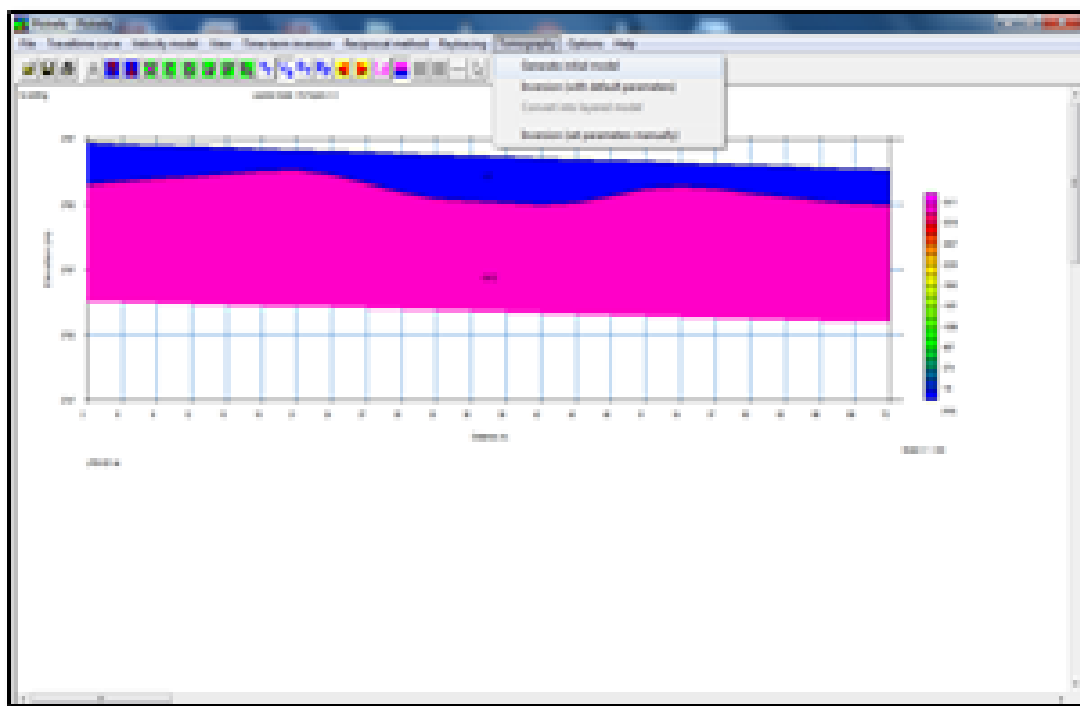


Figura 13. Ventana muestra los perfiles hallados y su correspondiente altura.

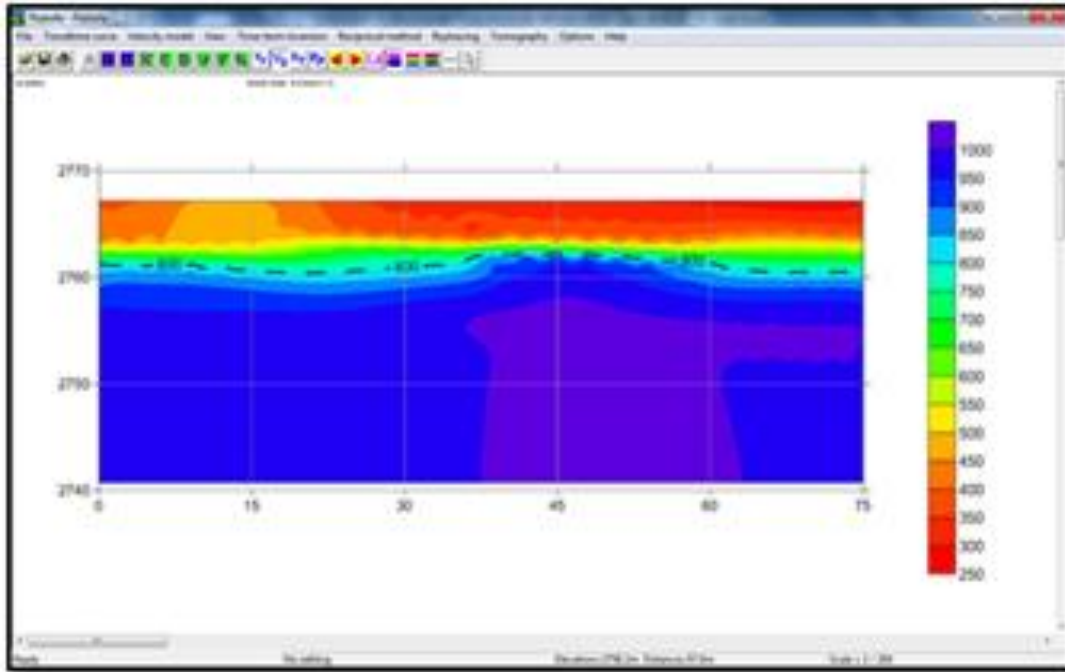


Figura 14. Ventana muestra modelo topográfico del subsuelo y la distribución de velocidades a diferentes alturas

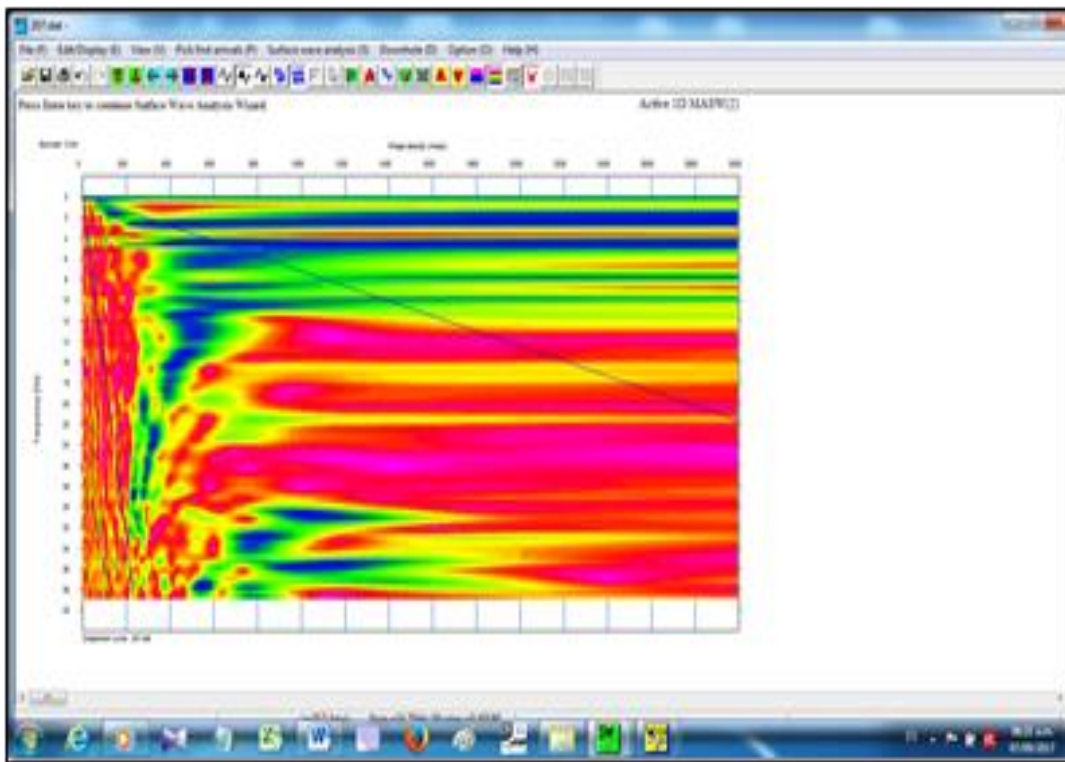


Figura 15. Ventana muestra las máximas amplitudes de cada frecuencia representada por los puntos rojos que se muestran

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se verán los resultados obtenidos para los ensayos realizados y se determinaran los parámetros elásticos hasta los 30m de profundidad las cuales son evaluados a partir de las velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) y velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ), con estos valores de velocidad de propagación de las ondas P y S ( $V_p$  y  $V_s$ ) a través del terreno y de los pesos volumétricos obtenidos se determina la relación de Poisson ( $\nu$ ), el módulo de corte dinámico ( $G$ ) y el Módulo de Young ( $E_{máx}$ ) del suelo en estudio. La clasificación del suelo se realiza de acuerdo al Código Internacional Buldog IBC (2012) y a la Norma E-0.30 de Diseño Sismorresistente 2017 en base a sus velocidades de ondas de corte, mediante el **Capítulo 2.3, Perfiles de suelo**, donde identifican el tipo de perfil de suelo de acuerdo a la velocidad promedio de ondas de corte de los 30 primeros metros, lo que permite diferenciar los tipos de suelos blandos (S3) de los suelos intermedios (S2) de las rocas o suelos muy rígidos (S1) y de la roca dura (S0).

### 1. Análisis para Refracción Sísmica

Según los Cuadros 5 y Cuadro 6, donde se muestran la longitud aproximada y resultados de velocidades longitudinales de los ensayos de Refracción Sísmica, para ser comparados con los valores establecidos en la Norma ASTM D-5777 que clasifica los suelos según la velocidad de ondas P ( $V_p$ ). Podemos determinar los estratos encontrados en las líneas de tendido realizadas y observar los siguientes resultados:

**Tabla 1.** Relación de Ensayos con líneas de refracción sísmica (LRS).

Línea Sísmica	Long. Aprox. (m)	Tipo de Onda
LRS-01	75.00	Onda P
LRS-02	75.00	Onda P
LRS-03	75.00	Onda P
LRS-04	75.00	Onda P
LRS-05	75.00	Onda P
TOTAL:	375.00	

#### Línea LRS-01

⇒ En el primer estrato detectado se alcanza una profundidad variable entre 0 y 0.3 m del nivel de terreno natural cuyo rango de velocidad de ondas P es menor de 300 m/s a cuya velocidad corresponde un suelo intemperizado (suelo de cobertura) que está compuesto de material orgánico y la presencia de raíces arbustos sobre su superficie según tabla 7.

⇒ En el segundo estrato detectado que varía desde una profundidad de 0.3 a 3.5m, se encontrara que la velocidad varía entre 300 a 800 m/s dicho estrato fue identificado como Grava o Arena seca según la tabla 2.

⇒ En el tercer estrato detectado que varía desde una profundidad de 3.5 - 6.1m a más, se encontró que la velocidad varía entre 800 a 1000 m/s dicho estrato fué identificado como Grava o Arena saturada según la tabla 2.

Se aclara que el rango de profundidades está en función del máximo valor en profundidad alcanzado por los ensayos de refracción sísmica realizados para cada línea de tendido en su respectiva área.

#### Línea LRS-02

⇒ En el primer estrato detectado se alcanza una profundidad variable entre 0 y 0.3 m del nivel de terreno natural cuyo rango de velocidad de ondas P es menor de 375m/s a cuya velocidad corresponde un suelo intemperizado o suelo de cobertura que este de material orgánico y la presencia de arbustos sobre su superficie.

⇒ En el segundo estrato detectado se alcanza una profundidad variable entre 0.3 y 2.2m cuyo rango de velocidad de ondas P oscila entre 375 a 800 m/s para esta velocidad correspondería el estrato de Grava o arena seca según la tabla 7.

⇒ En el tercer estrato detectado que varía desde una profundidad de 2.2 - 5.2m a más se encontró que la velocidad varía entre 800 a 850 m/s dicho estrato fue identificado como Grava o arena seca según el Cuadro 2.

### LINEA LRS-03

⇒ En el primer estrato detectado se alcanza una profundidad variable entre 0 y 0.4 m del nivel de terreno natural cuyo rango de velocidad de ondas P es menor de 440 m/s a cuya velocidad corresponde un suelo intemperizado (suelo de cobertura) que este de material orgánico y la presencia de arbustos sobre su superficie.

⇒ En el segundo estrato detectado que varía desde una profundidad de 0.4-4.3 m y cuyo rango de velocidad de ondas P oscila entre 440 a 800 m/s para esta velocidad correspondiente el estrato de Grava o arena seca según el tabla 2.

⇒ En el tercer estrato se encontró que la velocidad varía entre 800 -880 m/s a mas dicho estrato fue identificado como Grava o arena seca según la NORMA ASTM D-5777.

### LINEA LRS-04

⇒ En el primer estrato detectado se alcanza una profundidad variable entre 0 y 0.3 m del nivel de terreno natural cuyo rango de velocidad de ondas P es menor de 320m/s a cuya velocidad corresponde un suelo intemperizado o suelo de cobertura que este de material orgánico y la presencia de arbustos sobre su superficie.

⇒ En el segundo estrato detectado se alcanza una profundidad variable entre 0.3 y 4.3m del nivel de terreno natural cuyo rango de velocidad de ondas P oscila entre 320 a 800 m/para esta velocidad correspondería el estrato de Grava o arena seca según la tabla 2.

⇒ En el tercer estrato detectado que varía desde una profundidad de 4.3-10.3m a mas se encontró que la velocidad varía entre 800 a 880 m/s dicho estrato fue identificado como Grava o arena seca según la NORMA ASTM D 5777.

### LINEA LRS-05

⇒ En el primer estrato detectado se alcanza una profundidad variable entre 0 y 0.4 m del nivel de terreno natural cuyo rango de velocidad de ondas P es menor de 360m/s a cuya velocidad corresponde un suelo intemperizado o suelo de cobertura que este de material orgánico y la presencia de arbustos sobre su superficie.

⇒ En el segundo estrato detectado se alcanza una profundidad variable entre 0.4 y 1.3 m del nivel de terreno natural cuyo rango de velocidad de ondas P oscila entre 360 a 600 m/s para esta velocidad correspondería el tipo de suelo Grava o arena seca según la tabla 2.

⇒ En el tercer estrato detectado que varía desde una profundidad de 1.3- 6.2m a mas se encontró que la velocidad varía entre 600 a 720 m/s dicho estrato fue identificado como Grava o arena seca según la tabla 2.

Esta clasificación de los perfiles de suelo encontrados en las diferentes líneas de tendido sísmico según el rango de velocidades de ondas P determinadas con el ensayo de Refracción Sísmica nos lleva a realizar un cuadro comparativo con los resultados del estudio de mecánica de suelos realizado para dicho área de proyecto (estudio que se realizó, mediante métodos tradicionales con la excavación de calicatas in situ), en cuyos resultados podemos observar semejante clasificación, donde se puede apreciar 3 estratos para cada línea de tendido según el valor de sus velocidades, siendo el tercer estrato el de mayor espesor que una vez llegado a grava o arena seca el rango de velocidad se mantuvo hasta llegar a los 30m de profundidad aproximadamente ver la tabla 3.

**Tabla 2.** Cuadro comparativo de EMS y ensayo de refracción sísmica.

Línea	Estrato	Vp (m/s)	Espesor (m)	Interpretación	Descripción
LRS – 01	1	<300	0 – 0.3	Suelo Intemperizado	Suelo orgánico, entre 10 y 30cm con presencia de raíces.
	2	300 – 800	0.3–3.5	Grava o arena	Material de origen volcánico conformado por un suelo

				seca	arcillo - limoso a arenoso compacto.
	3	800 – 1000	3.5 – >6.1	Arena saturada	Material conformado por la alteración de la toba volcánica muy denso a roca tobacea fracturada
LRS – 02	1	<375	0 – 0.3	Suelo Intemperizado	Suelo orgánico, entre 10 y 30cm con presencia de raíces.
	2	375 – 800	0.3–2.2	Grava o arena seca	Material de origen volcánico conformado por un suelo arcillo - limoso a arenoso compacto.
	3	800 – 850	2.2 – >5.2	Grava o arena seca	Material de origen volcánico conformado por un suelo arcillo - limoso a arenoso compacto.
LRS – 03	1	<440	0 – 0.40	Suelo Intemperizado	Suelo orgánico, entre 10 y 30cm con presencia de raíces.
	2	440 – 800	0.4 – 4.3	Grava o arena seca	Material de origen volcánico conformado por un suelo arcillo - limoso a arenoso compacto.
	3	800 – 880	4.3 – >8.2	Grava o arena seca	Material de origen volcánico conformado por un suelo arcillo - limoso a arenoso compacto.
LRS – 04	1	<320	0 – 0.3	Suelo Intemperizado	Suelo orgánico, entre 10 y 30cm con presencia de raíces.
	2	320 – 800	0.3 – 4.3	Grava o arena seca	Material de origen volcánico conformado por un suelo arcillo - limoso a arenoso compacto.
	3	800 – 880	4.3 – >10.3	Grava o arena seca	Material de origen volcánico conformado por un suelo arcillo - limoso a arenoso compacto.
LRS – 05	1	<360	0– 0.4	Suelo Intemperizado	Suelo orgánico, entre 10 y 30cm con presencia de raíces.
	2	360 – 600	0.4 – 1.3	Grava o arena seca	Material de origen volcánico conformado por un suelo arcillo - limoso a arenoso compacto.
	3	600 – 720	1.3 – 6.2	Grava o arena seca	Material de origen volcánico conformado por un suelo arcillo - limoso a arenoso compacto.

## 2. Análisis para MASW

Los resultados de las tablas 9 y 10 muestran que el comportamiento dinámico del suelo en el área de estudio de los sondeos MASW-01, MASW-02, MASW-03, MASW-04 y MASW-05 corresponden a un suelo Tipo C (suelo muy denso o roca blanda, según IBC 2012) y a un suelo tipo S2 (suelo intermedio según Norma E-030 Sismorresistente), cuyas velocidades promedio de ondas de corte  $V_{s30}$  se encuentran en el rango de **389 m/s** y **444 m/s**. Los resultados

de este cálculo se aprecian en el Cuadro 3. Según Norma Técnica E-030 "DISEÑO SISMORRESISTENTE", clásica los suelos según 5 tipos, como puede ver en el de la Norma E-030 Sismorresistente, en el presente caso considera la zona de estudio como Perfil Tipo S2, a este tipo corresponden los suelos medianamente rígidos, con velocidades de propagación de onda de corte  $V_s$ , entre **180 m/s y 500 m/s**, definidos como suelos intermedios de Arena densa, gruesa a media, o grava arenosa medianamente densa, con valores del SPT  $N_{60}$ , entre 15 y 50.

**Tabla 3.** Velocidades promedio de ondas ( $V_{S30}$ ) a 30 m de profundidad.

Ensayo MASW	$V_{S30}$ (m/s)	Tipo de suelo (según IBC-2012)	Descripción tipo de suelo IBC-2012	Tipo de suelo Norma E-030	Descripción del tipo de suelo E-030
MASW-01	444	C	Suelo muy denso o roca blanda	S2	Suelos intermedios
MASW-02	469	C	Suelo muy denso o roca blanda	S2	Suelos intermedios
MASW-03	481	C	Suelo muy denso o roca blanda	S2	Suelos intermedios
MASW-04	385	C	Suelo muy denso o roca blanda	S2	Suelos intermedios
MASW-05	389	C	Suelo muy denso o roca blanda	S2	Suelos intermedios

Las tablas 4, 5, 6, 7 y 8, presentan los valores de velocidad secundaria  $V_{S30}$  y la determinación de los módulos de deformación (E) y módulos de corte (G), pertenecientes a estados elásticos del material.

**Tabla 4.** Cuadro de parámetros elásticos promedio según ensayo MASW-01.

Suelo	Prof. Prom (m)	Espesor de estrato (m)	$V_p$ (m/s)	$V_{S30}$ (m/s)	$\gamma$ ( $t/m^3$ )	$\nu$ poisson	G ( $t/m^2$ )	E ( $t/m^2$ )
Suelo intemperizado	0.3	0.3	300	219	1.6	0.1	7673.76	16428.52
Grava o arena seca	6.2	5.8	550	283	1.6	0.32	12814.24	33828.38
Arena saturada	30	23.8	900	526	1.6	0.24	44268.16	109839.20

**Tabla 5.** Cuadro de parámetros elásticos promedio según ensayo MASW-02.

Suelo	Prof. Prom (m)	Espesor de estrato (m)	$V_p$ (m/s)	$V_{S30}$ (m/s)	$\gamma$ ( $t/m^3$ )	$\nu$ poisson	G ( $t/m^2$ )	E ( $t/m^2$ )
Suelo intemperizado	0.3	0.3	375	244	1.6	0.13	9525.76	21583.41
Grava o arena seca	4.8	4.5	587	270	1.6	0.37	11664.00	31862.07



Arena saturada	30	25.2	825	512	1.6	0.19	41943.04	99555.25
----------------	----	------	-----	-----	-----	------	----------	----------

**Tabla 6.** Cuadro de parámetros elásticos promedio según ensayo MASW-03.

Suelo	Prof. Prom (m)	Espesor de estrato (m)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	γ (t/m <sup>3</sup> )	v poisson	G (t/m <sup>2</sup> )	E (t/m <sup>2</sup> )
Suelo intemperizado	0.3	0.3	440	254	1.6	0.25	10322.56	21808.48
Grava o arena seca	4.5	4.2	620	296	1.6	0.35	14018.56	37917.15
Arena saturada	30	24.5	840	513	1.6	0.20	42107.04	101274.80

**Tabla 7.** Cuadro de parámetros elásticos promedio según ensayo MASW-04.

Suelo	Prof. Prom (m)	Espesor de estrato (m)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	γ (t/m <sup>3</sup> )	v poisson	G (t/m <sup>2</sup> )	E (t/m <sup>2</sup> )
Suelo intemperizado	0.3	0.3	320	173	1.6	0.29	4788.64	12388.31
Grava o arena seca	5.9	5.6	560	196	1.6	0.43	6146.56	17581.61
Arena saturada	30	24.1	840	479	1.6	0.26	36710.56	92442.40

**Tabla 8.** Cuadro de parámetros elásticos promedio según ensayo MASW-05.

Suelo	Prof. Prom (m)	Espesor de estrato (m)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	γ (t/m <sup>3</sup> )	v poisson	G (t/m <sup>2</sup> )	E (t/m <sup>2</sup> )
Suelo intemperizado	0.3	0.3	360	238	1.6	0.11	9063.04	20152.46
Grava o arena seca	8.0	7.7	480	298	1.6	0.19	14208.64	33714.76
Arena saturada	30	24.1	1320	461	1.6	0.43	34003.36	97286.55

## DISCUSIÓN

- Según el resultado obtenido para las velocidades (V<sub>p</sub>) con relación a la Norma ASTM D 5777 se encontrarían entre los valores establecidos, así mismo de clasificarlos según con los tipos de suelos de manera similar.
- Asu vez las velocidades V<sub>s30</sub> obtenidas por le método multicanal pertenecen a suelos intermedios S2 según norma de E-030 Sismorresistente.
- Los módulos de deformación elástico y por corte E y G, pertenecen a suelos áridos y de condiciones intermedias a densas, los cuales manifestarían que en la zona del pabellón de Ing. Civil se presentan materiales similares a lo considerado en la formación Ayacucho.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alva Valdivia, L. (1996). Propiedades geofísicas de la tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica. Pp. 10-12. Audemard M., F. (1991) Tectonics of western Venezuela. Houston, Rice University.
2. Ampuero S. Alejandro,(1999): \Velocidades de Onda medidas en Santiago con el Ensayo de Refracción sísmica". SeisImaer Manual /1D TM: version; Pickwin v. 4.0.1.5,Plotrefa v. 2.9.1.6.
3. Asten, M. (1978). Geological control of the three-component spectra of Rayleigh-wave microseisms. Bull. Seism. Soc. Am. 68(6), 1623–1636
4. Asten, M. y Henstridge, J. (1984). Arrays estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins. Geophysics 49(11), 1828–1837.
5. Ben-Menahem, A. y Singh, S. (2000). Seismic waves and sources, Dover Publications Inc. New York, 1102 pp
6. Bonnefoy-Claudet, S., F. Cotton, P.-Y. Bard (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review, Earth-Science Reviews 79, 205-227.
7. Brocher, Thomas (2005a) Compressional and shear wave velocity versus depth in the San Francisco Bay area, California: Rules for USGS Bay area velocity. Model 05.0.0. USGS.U.S. Geological survey.
8. Hayashi, K., Takahashi, T., (2001). High Resolution Seismic Refraction Method Using Surface and Borehole Data for Site Characterization of Rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science"
9. Espíndola, 1994; Cuadra, 2007; Monroe et al. 2008 Posgrado en ciencias de la tierra centro de geociencias. UNAM.MEXICO
10. Foti, S. (2000). Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface. Waves. PhD dissertation, Politecnico di Torino, Italy.
11. Gutenberg, B. (1958). Microseisms. Advances in Geophysics 5, 53-92.UNSA
12. García, K., Morales, C., Sánchez, j., Schmitz, M. (2006). Determination de Velocidades de Ondas de Corte (Vs30) en el area metropolitana de Caracas, a partir de conversion SPT-Velocidades de Ondas de Cortes, análisis de Ondas superficiales y seismic de refracción. VIII CONVESIS, Valencia, 2006, Memorials en CD, 9 pp
13. Choon B. Park, Richard D Miller, and Jianghai Xia (1999) paper: "Multichannel analysis of surface waves".
14. Semblat J., Pecker A. (2009) Waves and Vibrations in Soils: Earthquakes, Traffic, Shocks, Construction works. Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia. Italia.
15. Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst.; 30(1), 25-30.NY.
16. Norma ASTM-D5777 \Standard Guide for Using the Seismic Refraction method for Subsurface Investigation".
17. Norma Peruana E-0.30 de Diseño Sismorresistente (2016).