

Caracterización del subsuelo a partir del método Downh Hole con sismógrafo de 24 canales

Adolfo Reyes Mantilla

Andrés Felipe León Plata

Trabajo de Grado presentado como Requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Ingeniera Civil. Ms.c, Hebenly Celis Leguizamo



Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2017

Agradecimientos

A nuestra alma mater y en especial a la Escuela de Ingeniería Civil, la cual con ayuda de nuestros profesores no formo hasta alcanzar tan anhelado logro.

A nuestra directora Hebenly Celis Leguizamo, quien oriento nuestro trabajo.

A Geomática quien nos colaboró a la investigación y el buen manejo de los equipos utilizados para la elaboración de los ensayos realizados en el campus universitario.

A mis padres por el apoyo, sus consejos y compañía han hecho de mí una gran persona.

A nuestras novias por su colaboración y paciencia.

Gracias

Tabla de contenido

	Pag.
Introducción	13
1. Ondas elásticas en la corteza terrestre	15
1.1 Ondas transversales y longitudinales	15
1.1.1 Ondas transversales	15
1.1.2 Ondas longitudinales:	15
1.2 Ondas superficiales	16
1.2.1 Ondas Rayleigh:	16
1.2.2 Ondas Love	17
1.3 Ondas internas	17
1.3.1 Ondas P:	17
1.3.2 Ondas S	17
2. Propiedades Dinámicas	17
2.1 Módulo cortante	18
2.2 Relación de Poisson	18
2.3 Módulo de Young	19
3. Método sísmico Down Hole	20
4. Ubicación de la zona de estudio	21
5. Metodología	23

5.1 Preliminares.....	23
5.2 Proceso en campo.....	24
5.2.1 Instalación de los equipos	24
5.2.2 Realización del ensayo	24
5.3 Análisis de datos	26
5.3.1 Software Pickwin.....	26
5.3.2 Software PSLog.....	27
5.4 Análisis de resultados	29
5.4.1 Ventajas.....	34
5.4.2 Limitaciones	34
6. Conclusiones	34
Referencias Bibliográficas	35
Apéndice	37

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Ilustración onda transversal	15
Figura. 2. Ilustración onda longitudinal	16
Figura. 3. Módulo cortante.....	18
Figura 4. Relación de Poisson.....	19
Figura 5. Módulo de Young	20
Figura 6. Sondeo para la realización del ensayo sísmico Down hole	21
Figura 7. Localización del municipio de Bucaramanga, Departamento de Santander, Colombia.....	22
Figura 8. Localización de la zona de estudio, Universidad Industrial de Santander, Ubicación ensayo sísmico	22
Figura 10. Interfaz Geometrics Seismodule Controller	25
Figura 9. Interfaz Geometrics Seismodule Controller	25
Figura 11. Geófono triaxial en sondeo.....	25
Figura 12. Picado de onda P	27
Figura 13. Línea de velocidad de onda P (a)	28
Figura 14. Línea de velocidad de onda P (b)	28
Figura 15. Estratigrafía del suelo	30
Figura 16. Estratigrafía del suelo según Refracción sísmica	31
Figura 17. Estratigrafía del suelo según MAS W	32

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. Velocidades de onda P y S según su profundidad	29
Tabla 2. Caracterización de materiales según la velocidad de onda longitudinal. Perry H. Rahn, Engineering Geology An Enviromental Approach, USA, Elsevier Science Publishing, 1986.....	30

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Manual de uso para el ensayo down-hole por medio del geode ultra-light exploration seismograph y geostuff wall-lock borehole geophones (bhgc-4 geophone controller)y manejo del programa geometrics seismodule controller.....	37

Resumen

Título: Caracterización del subsuelo a partir del método Down Hole con sismógrafo de 24 canales.*

Autores: Adolfo Reyes Mantilla, Andrés Felipe León Plata.**

Palabras Claves: Down Hole, Ondas P, Ondas S, Geode Ultra-Light Explorationseismograph, Geostuff Wall-Lock Borehole Geophone, Subsuelo, Estratigrafía, Geotecnia, Geometrics Seismodule Controller.

Descripción:

Este artículo presenta una manera de explicar el método nombrado *Down Hole*, el cual consiste en obtener generación y propagación de ondas P y S de cada estrato dependiendo de su profundidad. Para el uso correcto de este método existen dos equipos el cual el *Geode Ultra-light Exploration Seismograph* de manera autónoma realiza estudios de ondas sísmicas, por el contrario el siguiente equipo llamado *Geostuff Wall-lock Borehole Geophone* en unión con el equipo anteriormente nombrado, extrae los datos requeridos para la elaboración del método. El presente estudio se procederá a determinar un perfil del suelo por el cual se mostrará los principios físicos que este requiere, y se obtendrá el cálculo de diversas propiedades dinámicas del suelo, tales como el módulo de cortante o módulo de cizalladura, relación de *Poisson* y el módulo de *Young* o límite elástico, mostrando todo lo necesario para llevar a cabo satisfactoriamente dicho método, desde el equipo a utilizar, el software *Geometrics Seismodule Controller*, así como también los respectivos cálculos que se hacen a la información de datos y la importancia que tiene estos en el campo de la geotecnia. Así mismo, los cálculos obtenidos por medio del ensayo *Down Hole*, realizado en la Universidad Industrial de Santander, se comparan con los ensayos de Refracción sísmica y MAS W y así obtener ventajas y limitaciones de los ensayos anteriormente nombrados

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ingeniera Civil. Ms.c, Hebenly Celis Leguizamo

Abstract

Title: Characterization of the subsuel from the Down Hole method with 24 channel sismograph.*

Author: Adolfo Reyes Mantilla, Andrés Felipe León Plata.**

Key Wors: Down Hole, P Waves, S Waves, Geode Ultra-Light Explorationseismograph, Geostuff Wall-Lock Borehole Geophone, Subsoil, Soil's Profile, Geotechnics, Geometrics Seismodule Controller.

Description:

This paper presents a way to explain the method named Down Hole, which consists in obtaining generation and propagation of P and S waves of each stratum depending on its depth. For the correct use of this method there are two teams which the Geode Ultra-light Exploration Seismograph independently performs studies of seismic waves, on the contrary the following equipment called Geostuff Wall-lock Borehole Geophone in union with the equipment previously named, extracts the data required for the development of the method. The present study will proceed to determine a soil profile by which the physical principles that it requires will be shown, and the calculation of various dynamic properties of the soil, such as the shear modulus or shear modulus, Poisson ratio, and Young's modulus or elastic limit, showing everything necessary to carry out satisfactorily said method, from the equipment to be used, the software Geometrics Seismodule Controller, as well as the respective calculations that are done to the data information and the importance which has these in the field of geotechnics. Likewise, the calculations obtained by means of the Down Hole test, carried out at the Industrial University of Santander, are compared with the tests of seismic refraction and MAS W and thus obtain advantages and limitations of the previously mentioned tests

* Degree work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Civil Engineer. Ms.c, Hebenly Celis Leguizamo

Introducción

En toda obra en la que se requiera el conocimiento de la ingeniería moderna, tales como edificios, viviendas entre otros, es de suma importancia la elaboración de un estudio de suelos, ya que ayuda a la obtención y verificación de las propiedades físicas y mecánicas del suelo ya que así podremos conocer su composición estratigráfica, es decir, sus capas o estratos en profundidad e incluso la existencia del nivel freático y su ubicación. Logrando como resultado la resistencia de dicho terreno para la elaboración de diferentes proyectos.

Está comprobado que toda la cubierta terrestre tiene la capacidad de transmitir ondas elásticas si se presenta un medio en el cual se puedan generar, con base a este argumento se llegó a la conclusión de poder experimentar y estudiar la posibilidad de generar sismos artificiales y la detección de los movimientos ondulatorios, para determinar las características de subsuelo. Ya que en determinadas ocasiones la utilización de los métodos convencionales se puede presentar el problema de que no hay una buena descripción del tipo de suelo y sus características; lo cual genera un mayor costo y riesgo en la construcción de proyectos de gran magnitud.

En este trabajo de grado se mostrará cómo determinar el perfil del suelo situado en la Universidad Industrial de Santander, sector *El Bosque* mediante el método *Down Hole* utilizando los equipos llamados *Geode Ultra-light Exploration Seismograph* y *Geostuff Wall-Lock Borehole Geophone*, el cual se presentará sus principios básicos de física los cuales comprenderá el comportamiento de las ondas y su respectivo uso en la geotecnia, también se enseñará la utilización del equipo junto con su respectivo procedimiento para llevar a cabo el ensayo.

Una vez realizado el trabajo en campo se introducirá el respectivo procedimiento a seguir en los software *Geometrics Seismodule Controller*, *Pickwin* y *PSLog*, para la obtención de los datos de tiempo, los cuales serán sometidos a cálculos para hallar la velocidad con la que viajan las ondas a través del suelo. Estos datos de velocidad es el que nos ayuda a

determinar el perfil del suelo el cual le será de soporte al ingeniero para poder determinar a qué profundidad debe realizar el proyecto en el que se desea trabajar.

1. Ondas elásticas en la corteza terrestre

La onda elástica es la perturbación efectuada sobre un medio material y que se propaga con movimiento uniforme a través de este mismo medio. La rapidez con que se propaga la onda elástica depende de las propiedades físicas (tales como el modulo elástico, la densidad, la temperatura, etc.) del medio material que se perturba.

1.1 Ondas transversales y longitudinales

1.1.1 Ondas transversales:. Las partículas del medio oscilan en dirección perpendicular a la dirección en que se propaga el movimiento ondulatorio.

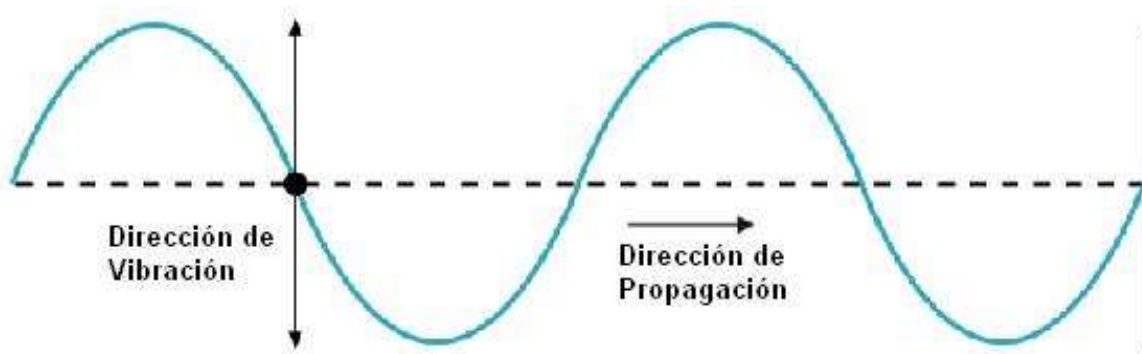


Figura 1. Ilustración onda transversal

1.1.2 Ondas longitudinales:. Las partículas del medio material oscilan en la misma dirección en que se propaga el movimiento ondulatorio.

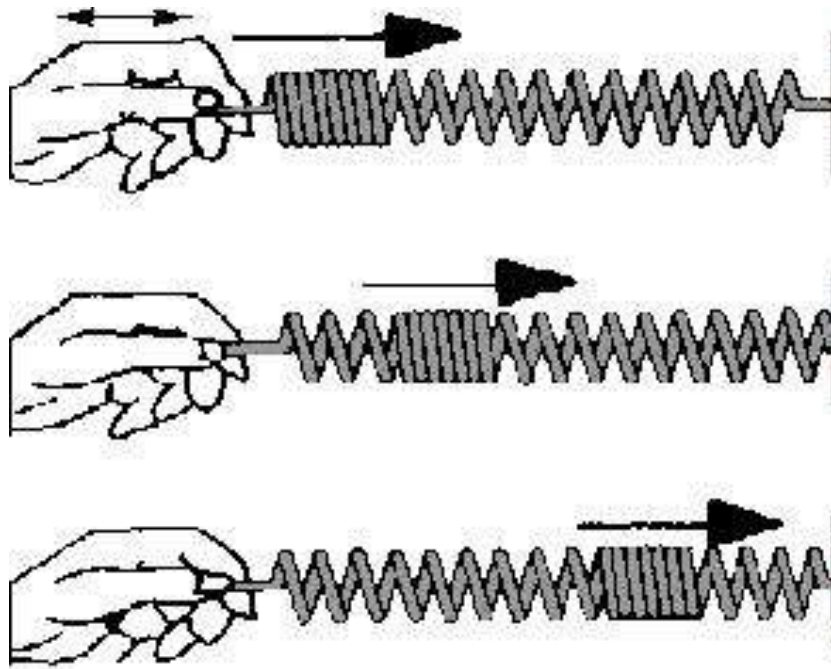


Figura. 2. Ilustración onda longitudinal

1.2 Ondas superficiales

Las ondas superficiales son ondas que se encuentran atrapadas cerca de la superficie de la tierra. Este tipo de ondas son importantes en sismología, como una manera de describir algunas olas causadas por los terremotos, así como en la radio para describir la propagación de ondas de radio. Las ondas superficiales pueden ser de naturaleza mecánica o electromagnética.

1.2.1 Ondas Rayleigh: Una onda de Rayleigh es otro tipo de onda sísmica de superficie que rueda sobre la superficie de la tierra, en lugar de desplazarse de un lado a otro. Una onda de Rayleigh simultáneamente mueve el suelo hacia arriba y hacia abajo y de lado a lado, resultando en una especie de movimiento de la partícula circular por debajo de la superficie de la tierra. Ya que es una de las ondas sísmicas más grandes, la Rayleigh es responsable de la mayor parte de la sacudida que se siente cuando se produce un terremoto.

1.2.2 Ondas Love: Una clase de onda mecánica, o una onda que se mueve a través de una superficie de onda, se conoce como una onda de Love. Este tipo de onda superficial fue nombrado después de A.E.H. Love, un matemático británico que descubrió la manera en que la este tipo de onda funciona. Esta onda se mueve de un lado a otro a través de la tierra a raíz de un terremoto. La onda de Love es el tipo más rápido de onda superficial que existe.

1.3 Ondas internas

Las ondas internas viajan a través del interior. Siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de la Tierra. Este efecto es similar al de refracción de ondas de luz. Las ondas internas transmiten los temblores preliminares de un terremoto pero poseen poco poder destructivo. Las ondas internas son divididas en dos grupos: ondas primarias (P) y secundarias (S).

1.3.1 Ondas P:. Las ondas P son ondas longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces la de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido. Velocidades típicas son 1450 m/s en el agua y cerca de 5000 m/s en el granito.

1.3.2 Ondas S: Las ondas S son ondas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación. Su velocidad es menor que la de las ondas primarias. Debido a ello, estas aparecen en el terreno algo después que las primeras. Estas ondas son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que producen la mayor parte de los daños. Solo se trasladan a través de elementos sólidos.

2. Propiedades Dinámicas

La amplificación del movimiento en el suelo está determinada por las propiedades dinámicas del suelo. Entre éstas, la rigidez del suelo y el amortiguamiento son las propiedades claves para el estudio de la respuesta de sitio. Una buena aproximación a la rigidez del suelo se

obtiene a partir del módulo de corte G que se calcula por medio de la velocidad de las ondas sísmicas. La razón de amortiguamiento muestra la capacidad que tiene el suelo para disipar la energía. Otras propiedades dinámicas son la densidad, relación de Poisson y el módulo de Young.

2.1 Módulo cortante

El módulo de elasticidad transversal, también llamado módulo de cizalladura, es una constante elástica que caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico (lineal e isótropo) cuando se aplican esfuerzos cortantes.

$$G = \rho * Vs^2 \quad \text{ecuación (1)}$$

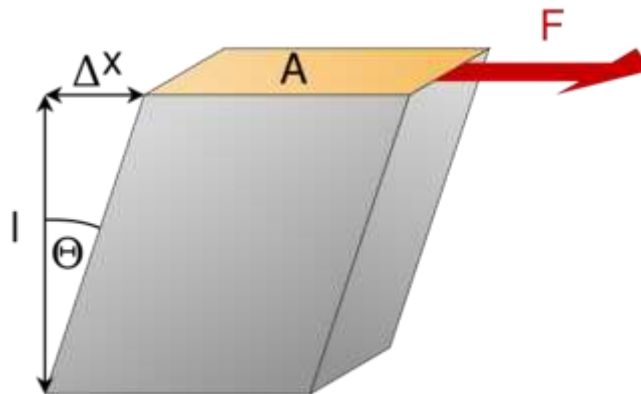


Figura. 2. Módulo cortante

2.2 Relación de Poisson

El coeficiente de Poisson es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.

$$v = \frac{0.5 * \left| \frac{Vp}{Vs} \right|^2 - 1}{\left(\frac{Vp}{Vs} \right)^2 - 1} \quad \text{ecuación (2)}$$



Figura 3. Relación de Poisson

2.3 Módulo de Young

El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Tanto el módulo de Young como el límite elástico son distintos para los diversos materiales.

Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, y es siempre mayor que cero: si se tracciona una barra, aumenta de longitud.

$$E = \frac{\rho * Vp^2 * (1 + v) * (1 - 2v)}{(1 - v)} \quad \text{ecuación (3)}$$

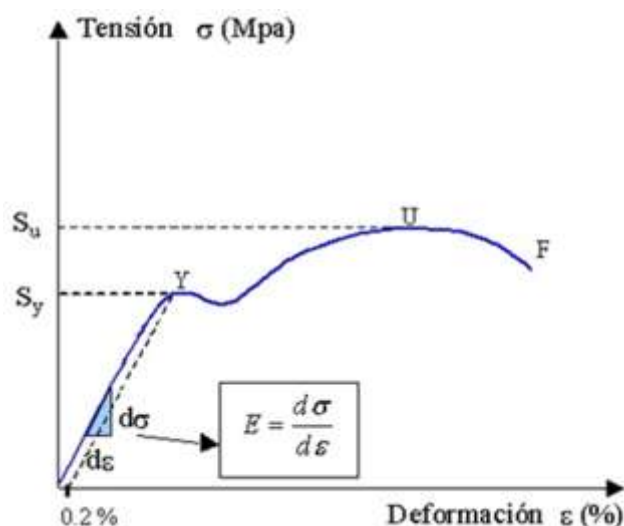


Figura 4. Módulo de Young

3. Método sísmico Down Hole

Con este método sísmico podemos medir el tiempo en que las ondas P y S tardan en llegar desde una fuente sísmica colocada en la superficie hasta el receptor ubicado en el interior de un sondeo.

Es necesario reducir al máximo el efecto de las perturbaciones en el terreno durante la elaboración del sondeo, estos deben ser entubados, por lo general con tubería de PVC, se rellenan con una lechada compuesta por agua, cemento y bentonita en proporción de 100, 30 e 5 partes en peso respectivamente, posteriormente deben ser revisados para asegurarse que dicho sondeo esté libre de obstrucciones y que el tubo no este dañado. Sin embargo, es de suma importancia revisar todos los componentes indispensables para una adecuada medición.

Para poder generar ondas elásticas direccionales y ricas en energía se emplea el uso de una fuente mecánica, en este caso, una porra. Así mismo debe unirse a la fuente un transductor (Trigger), lo cual es necesario para identificar el instante de partida de la onda.

Ahora bien se necesita un receptor que marque el punto de llegada de la onda en el sondeo, uno o más geófonos triaxiales son los encargados de dicho proceso, los cuales son

introducidos en este, deben contar con un sistema de anclaje para las paredes del tubo y una apropiada respuesta en frecuencia (4.5 – 14 Hz).

Todo esto debe ir conectado a un sismógrafo multi-canal que registre en forma digital las formas de onda y su memoria de masa.

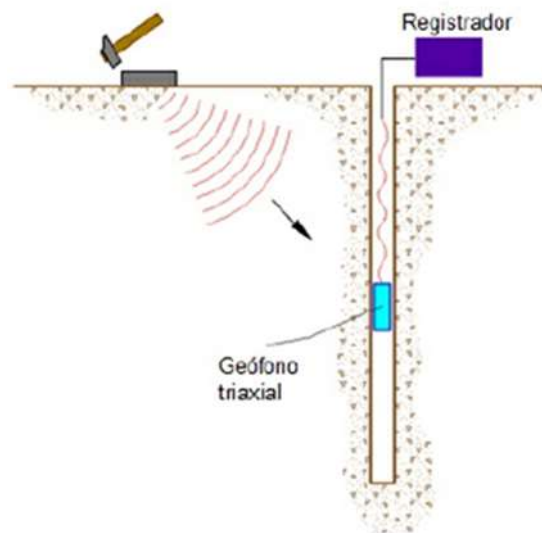


Figura 5. Sondeo para la realización del ensayo sísmico Down hole

4. Ubicación de la zona de estudio

El estudio se realizó en la Universidad Industrial de Santander en el noroccidente de las instalaciones, sector denominado “El Bosque” ubicado al suroccidente del edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Ver Figura 6, 7 y 8.



Figura 6. Localización del municipio de Bucaramanga, Departamento de Santander, Colombia. **Fuente: Google Maps**



Figura 7. Localización de la zona de estudio, Universidad Industrial de Santander, Ubicación ensayo sísmico. **Fuente: Google Maps**



Imagen. 1. Localización de la zona de estudio, Universidad Industrial de Santander, Ubicación ensayo sísmico

5. Metodología

5.1 Preliminares

En primera instancia se revisó el sondeo para verificar que este esté libre de obstrucciones o que el tubo de PVC estuviera en mal estado y así mismo la posible presencia de agua.



Imagen. 2. Sondeo en el cual se realizará el ensayo

5.2 Proceso en campo

5.2.1 Instalación de los equipos . Se procede a instalar los equipos *Geode Ultra-Light Exploration Seismograph* y *Geostuff Wall-Lock Borehole Geophone* tal y como se muestra en la siguiente figura. Ver Figura 8. (Ver Manual Anexo, Inciso 3).

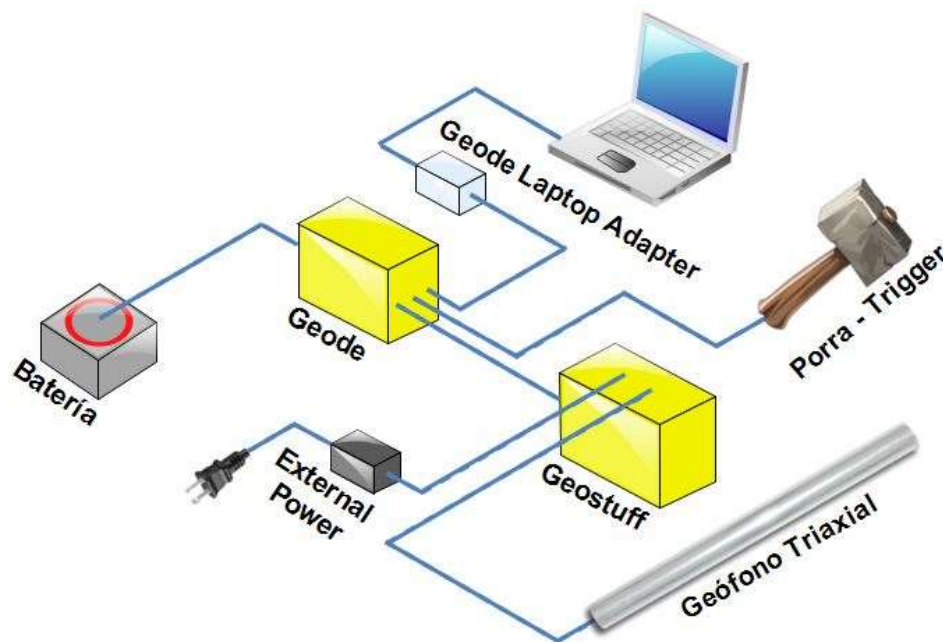


Figura 8. Diagrama conexión completa de los equipos Geode y Geostuff

5.2.2 Realización del ensayo. Una vez instalado el equipo se da inicio a la recolección de datos en campo por medio del software *Geometrics Seismodule Controller*. Este software permite obtener los datos del tiempo de viaje de las ondas P y S, y así mismo obtener el valor de las velocidades de dichas ondas. Ver Figura 9. (Ver Manual Anexo, Inciso 4).

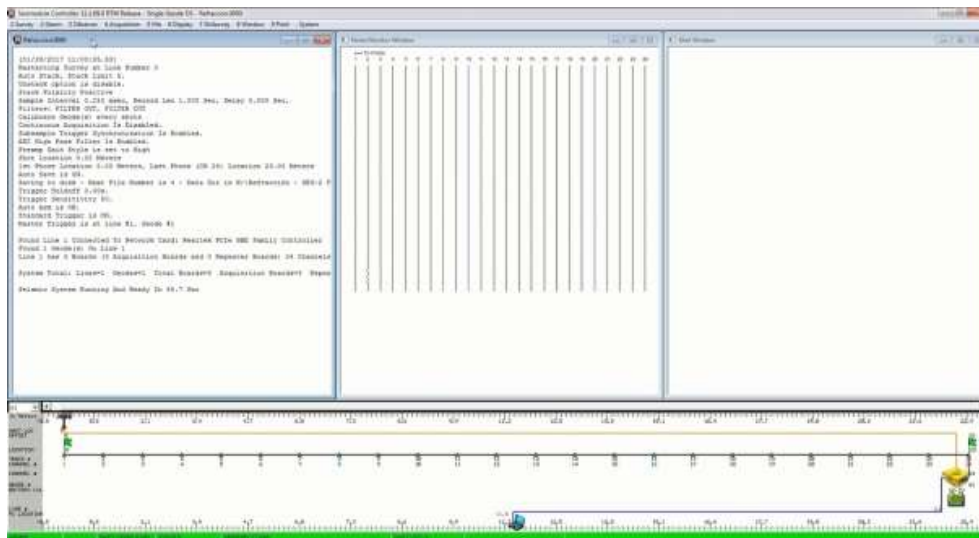


Figura 9. Interfaz Geometrics Seismodule Controller

Se introduce el Geófono triaxial al interior del sondeo y se desciende a cada metro de profundidad para la toma de las velocidades de onda generadas en la superficie. Ver Figura 10.

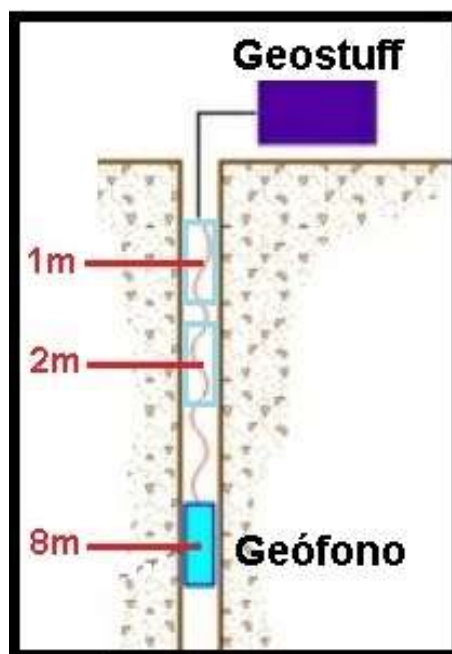


Figura 10. Geófono triaxial en sondeo

Para generar las ondas P se golpea la platina horizontalmente. Ver Imagen 3.



Imagen 3. Generación de onda P

Seguidamente producir ondas S, se golpea la platina verticalmente Ver Imagen 4.



Imagen 4. Generación de ondas

5.3 Análisis de datos

5.3.1 Software Pickwin. Este software sirve para marcar el punto de inicio de llegada de las ondas al Geófono triaxial. Los archivos generados por el software *Geometrics Seismodule Controller* son exportados al software *Pickwin* y aquí se procede a marcar el respectivo picado que consiste en trazar puntos en el inicio de cada onda para indicarle al

software el instante en que la onda llegó al Geófono triaxial. Ver Figura 11. (Ver Manual Anexo, Inciso 5).

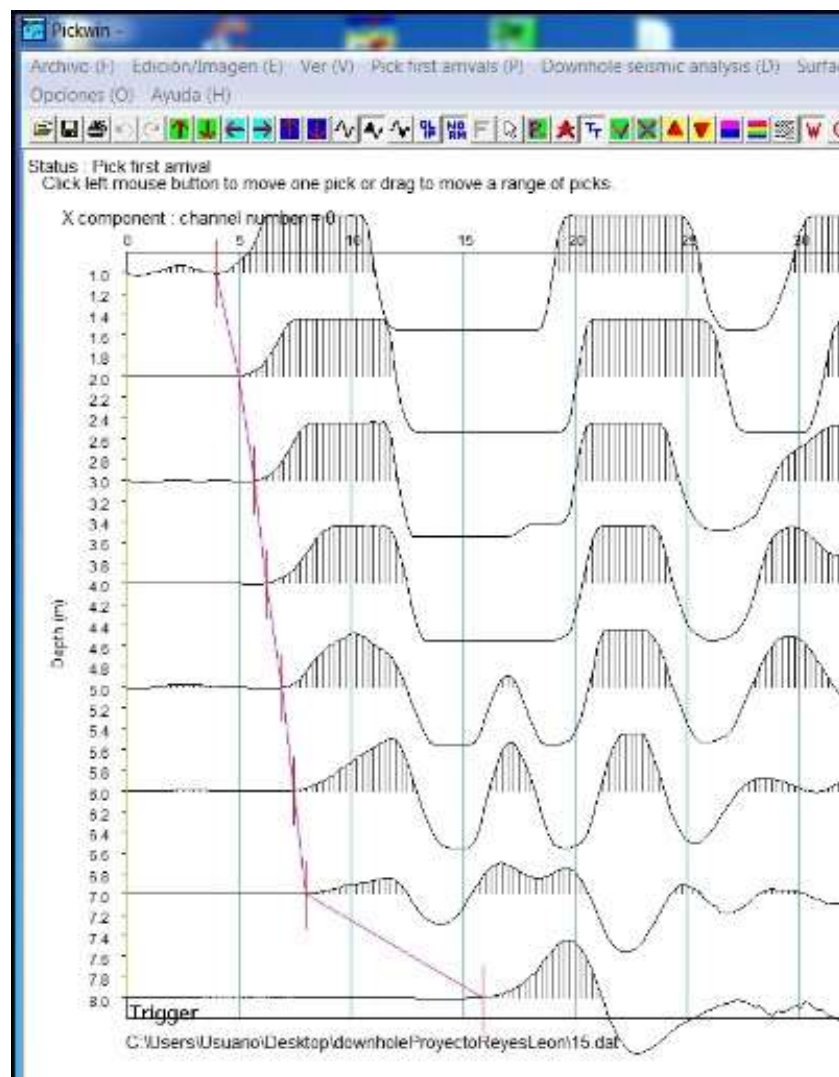


Figura 11. Picado de onda P

5.3.2 Software PSLog. Una vez hecho el picado de la onda abrimos el software PSLog, este programa sirve para trazar una línea según los tiempos de llegada de la onda que representa la velocidad de dicha onda (Ver Figura 12 y 13) (Ver Manual Anexo, Inciso 5).

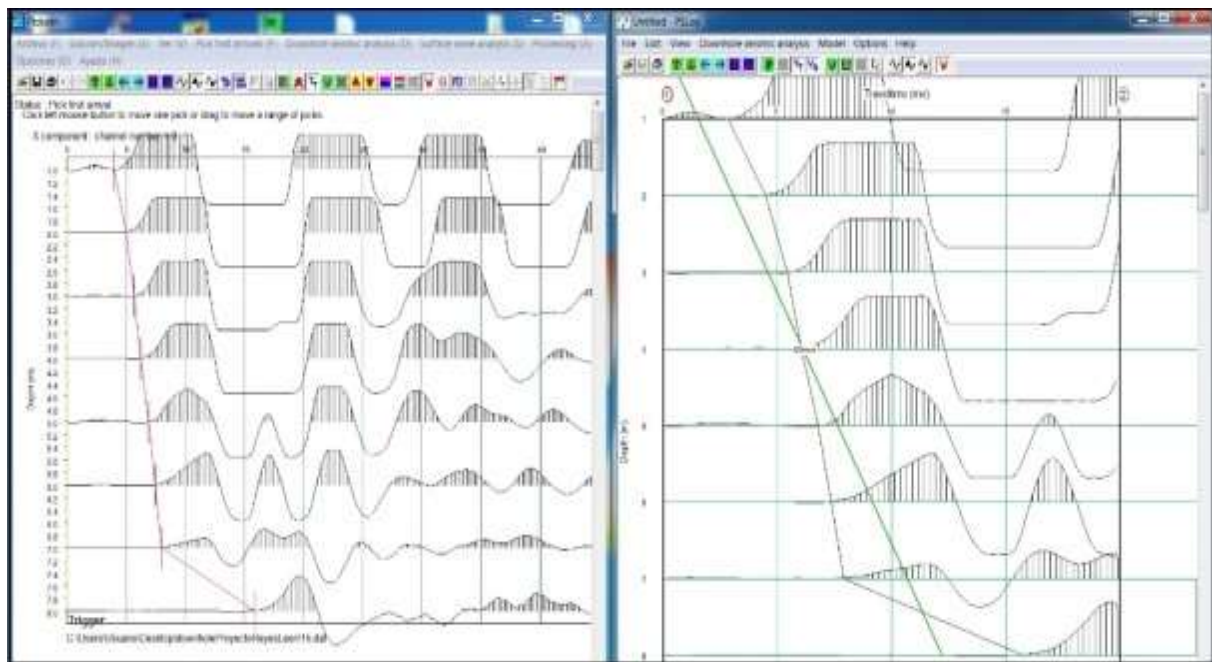


Figura 12. Línea de velocidad de onda P (a)

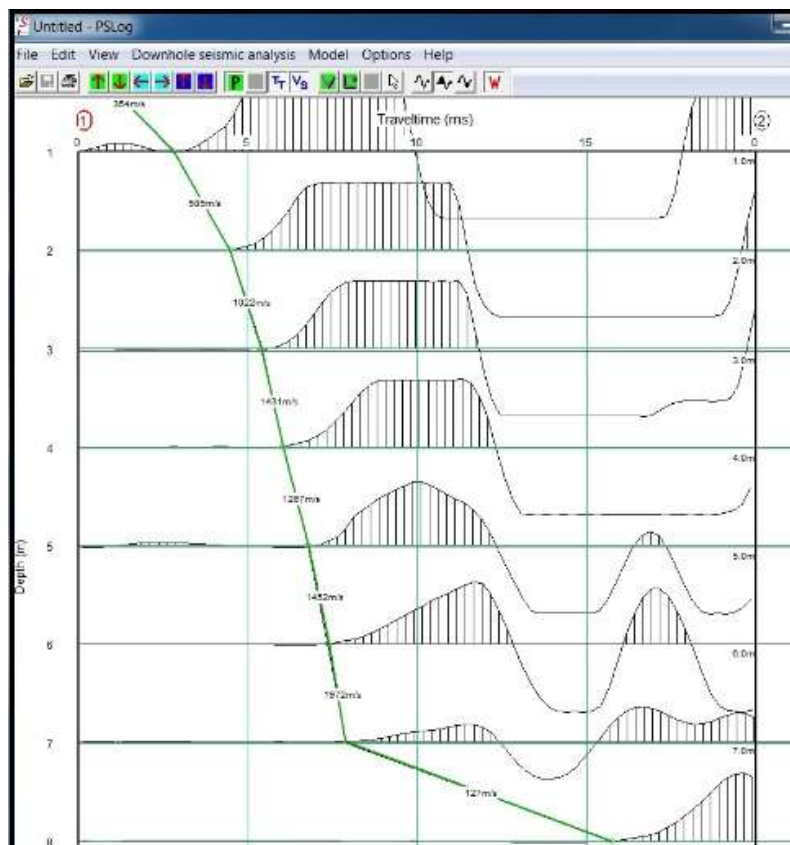


Figura 13. Línea de velocidad de onda P (b)

Y así se obtiene los valores de la velocidad de las ondas a cada metro de profundidad.

5.4 Análisis de resultados

Según lo desarrollado anteriormente se obtiene el valor de las velocidades de onda para cada medición (cada 1 metro de profundidad) obteniendo así ocho valores en total, ya que el estudio se realizó hasta ocho metros de profundidad (Ver Tabla 1).

Tabla 1.

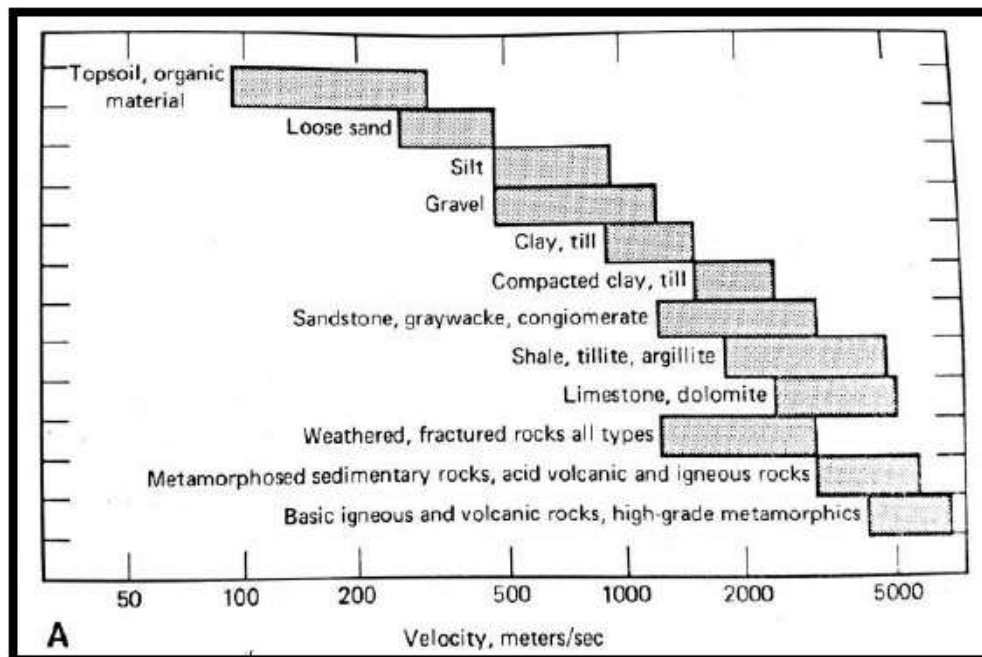
Velocidades de onda P y S según su profundidad

Profundidad [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]
0 - 1	349	139.6
1 - 2	550	225
2 - 3	865	357
3 - 4	1219	492.8
4 - 5	1326	530.4
5 - 6	1664	665.6
6 - 7	1800	720
7 - 8	130	58

De acuerdo a la tabla No. 2, se puede obtener la estratigrafía aproximada del suelo. Con la velocidad de onda P de la tabla No. 1.

Tabla 2.

Caracterización de materiales según la velocidad de onda longitudinal. Perry H. Rahn, Engineering Geology An Enviromental Approach, USA, Elsevier Science Publishing, 1986



Obteniendo así la siguiente estratigrafía. Ver Figura 14.

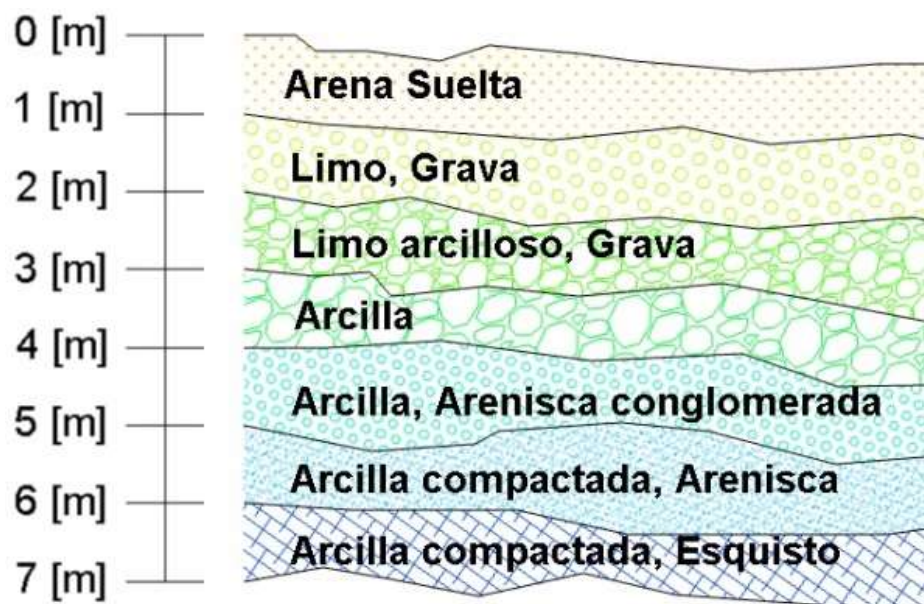


Figura 14. Estratigrafía del suelo

Comparando estos resultados con respecto a un estudio de refracción sísmica *Fuente: [Fernández Rojas, L. C., & Pérez Esparza, J. E. (2016). Determinación de velocidades de onda mecánica en un perfil de suelo en el campus universitario Uis]* Ver Figura 19.

Se puede observar que hay una gran similitud con respecto al tipo de suelo según la velocidad de onda longitudinal.

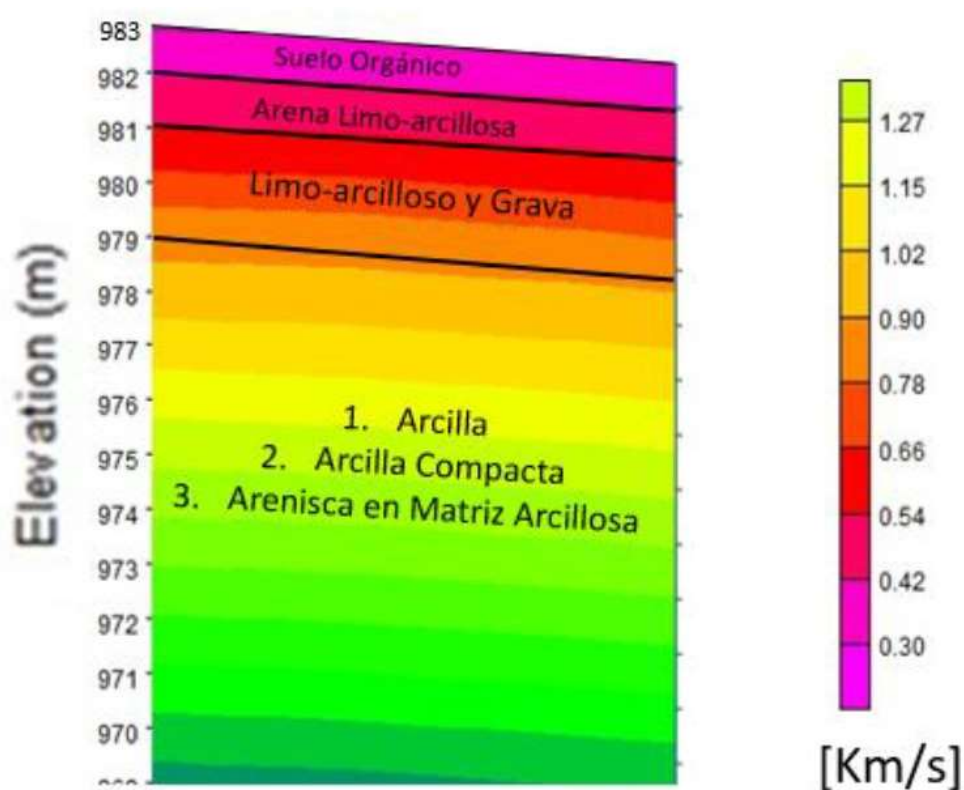


Figura 15. Estratigrafía del suelo según Refracción sísmica. **Fuente: Fernández Rojas, L. C, & Pérez Esparza, J. E. (2016). Determinación de velocidades de onda mecánica en un perfil de suelo en el campus universitario Uis**

Se puede observar que hay una gran similitud con respecto al tipo de suelo según la velocidad de onda longitudinal. Para el primer estrato se tiene una arena suelta, lo cual difiere del suelo orgánico en el ensayo de refracción, sin embargo para los siguientes estratos los resultados fueron análogos.

La estratigrafía obtenida en el estudio, también son comparados con un ensayo de *Mas W*. Se puede observar que los primeros estratos dan resultados similares, pero a medida que avanzamos en profundidad los resultados varían.

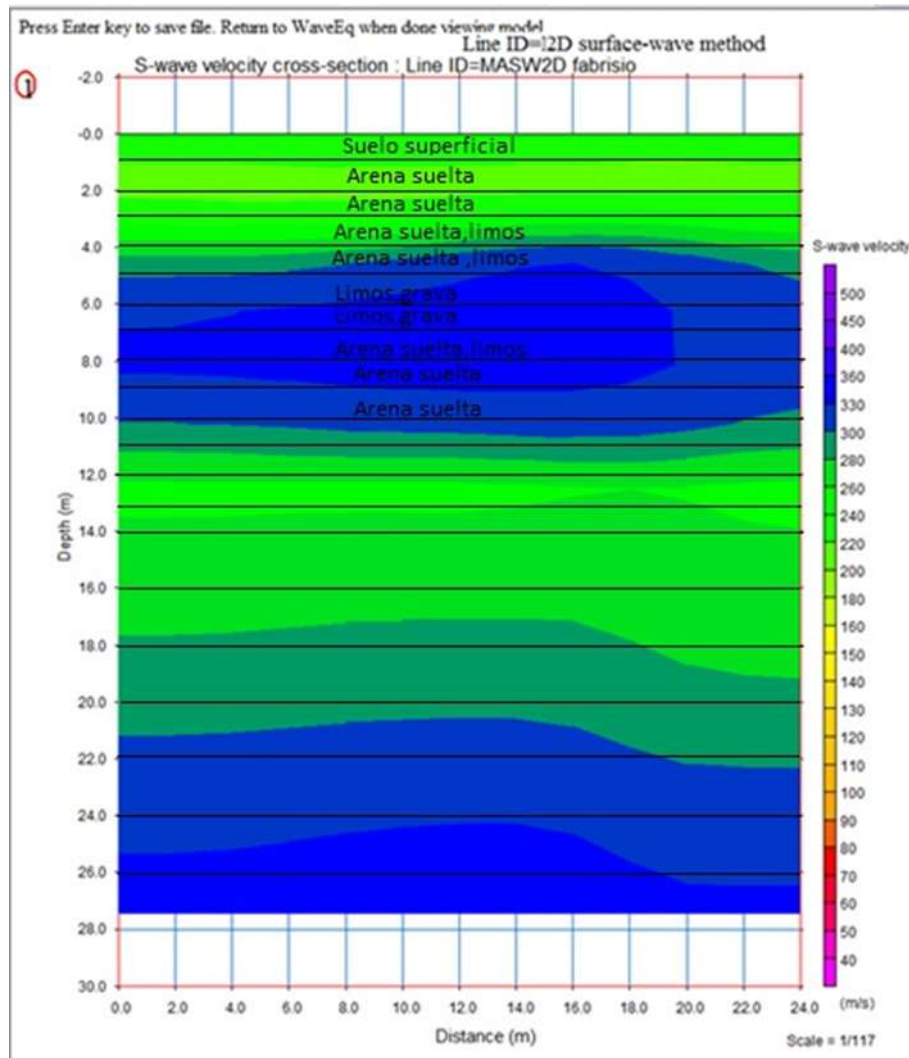


Figura 16. Estratigrafía del suelo según MAS W. Fuente: Pérez Sánchez F. (2017). Determinación de la velocidad de onda mecánica de un perfil de suelo mediante los ensayos sísmicos ReMi y MÁS W en el campus universitario

Con las velocidades de las ondas P y S también se puede obtener algunas propiedades dinámicas del suelo tales como.

- Módulo de Cortante:

Para el cálculo del módulo cortante es necesario conocer el valor de la densidad del suelo. Para este caso, la densidad del primer estrato es de 1.6527 [gr/cm³].

De acuerdo con la ecuación No. 1 se obtiene el siguiente valor:

$$G = 1652.7 * (139.6)^2 = 32.21 [MPa]$$

- Relación de Poisson:

De acuerdo con la ecuación No. 2 se obtiene el siguiente valor:

- Para el estrato 1:

$$v = \frac{0.5 * \left| \frac{349}{-139.6} \right|^2 - 1}{\left(\frac{349}{-139.6} \right)^2 - 1} = 0.4047$$

- Para el estrato 2:

$$v = 0.399503$$

- Para el estrato 3:

$$v = 0.39734$$

- Para el estrato 4:

$$v = 0.4023$$

- Para el estrato 5:

$$v = 0.4077$$

- Para el estrato 6:

$$v = 0.4047$$

- Para el estrato 7:

$$v = 0.4047$$

- Módulo de *Young*:

De acuerdo con la ecuación No. 3 se obtiene el siguiente valor:

$$E = \frac{1652.7 * 349^2 (1 + 0.3995)(1 - 2 * 0.3995)}{(1 - 0.3995)} = 44.2858 [MPa]$$

5.4.1 Ventajas

- La instalación del equipo para el ensayo *Down Hole* es más eficiente y eficaz en cuestión de tiempo.
- El procesado para la obtención de datos es más rápido.

5.4.2 Limitaciones

- El ensayo *Down Hole* requiere la elaboración de un sondeo, por tanto requiere una mayor inversión respecto al presupuesto para la realización del mismo (perforación, entubado y lechada).

6. Conclusiones

- El ensayo *Down Hole* nos permite una rápida y eficaz solución para la obtención de las velocidades de onda P y S.
- Por medio de este ensayo se puede obtener un perfil estratigráfico muy aproximado al de la realidad.
- Con la gran capacidad del equipo se puede obtener un perfil del suelo a grandes profundidades.
- Por medio de la velocidad de onda S se puede obtener el valor del módulo cortante, lo cual es de gran utilidad para la clasificación del suelo.
- Es importante tener un adecuado cuidado del sondeo, ya que si hay presencia de agua o algún otro material lo cual obstruya el geófono afectará la toma de datos.

Referencias Bibliográficas

- [1] Camacho Osmá, E. J., & González Parra, E. Y. (2012). Caracterización sísmica del subsuelo por medio del método downhole.
- [2] Cepeda Gómez, D. I., & Arenas López, L. B. (2010). Caracterización dinámica de suelos; estado del arte e implementación del laboratorio.
- [3] Ugalde Aguirre, A. (2009). Terremotos. Cuando la tierra tiembla. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- [4] Ph.D. Arribas, J. I. Ondas sísmicas. Retrieved from https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html
- [5] Velasquez, J. D. (2014). Determinación de las propiedades dinámicas del suelo por medio de métodos geofísicos. Retrieved from <https://prezi.com/uw31xqqnr4vh/determinacion-de-las-propiedades-dinamicas-del-suelo-por-med/>
- [6] Wikipedia. Coeficiente de poisson. Retrieved from https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_Poisson
- [7] Pérez González, A. (2014). Módulo de elasticidad. Retrieved from http://www.mecapedia.uji.es/modulo_de_elasticidad.htm
- [8] Geostru Software. (2013). Geostru DownHole Retrieved from www.geostru.com
- [9] Google Maps. (2015). Mapa Bucaramanga, Santander.
- [10] Perry H. Rahn., Engineering Geology An Enviromental Approach, USA, Elsevier Science Publishing, 1986.
- [11] Fernández Rojas, L. C., & Pérez Esparza, J. E. (2016). Determinación de velocidades de onda mecánica en un perfil de suelo en el campus universitario Uis.
- [12] Pérez Sánchez, F. (2017). Determinación de la velocidad de onda mecánica de un perfil de suelo mediante los ensayos sísmicos ReMi, Mas W en el campus universitario Uis.

- [13] Godard Robert.¿Cuáles son las ondas superficiales? Retrieved from http://www.ehowenespanol.com/cuales-son-ondas-superficiales-info_226313/
- [14] Universidad Nacional del Callao.Ondas elasticas. Retrieved from http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/Mayo_2011/IF_CABRERA_FIQ/CAP.%206.PDF
- [15] Universidad Politécnica de Cataluña.Los suelos. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3363/36067-6.pdf?sequence=6>

Apéndice

Apéndice A. Manual de uso para el ensayo down-hole por medio del geode ultra-light exploration seismograph y geostuff wall-lock borehole geophones (bhgc-4 geophone controller)y manejo del programa geometrics seismodule controller

MANUAL DE USO PARA EL ENSAYO DOWN-HOLE POR MEDIO DEL GEODE ULTRA-LIGHT EXPLORATION SEISMOGRAPH Y GEOSTUFF WALL-LOCK BOREHOLE GEOPHONES (BHGC-4 Geophone Controller)

Y

MANEJO DEL PROGRAMA GEOMETRICS SEISMODULE CONTROLLER

En este manual se presenta la forma de obtener la velocidad de las ondas P y S por medio del ensayo Down Hole, a través de los equipos Geode Ultra-Light Exploration Seismograph y Geostuff Wall-Lock Borehole Geophone.

Equipo

Geode Ultra-Light Exploration Seismograph

Generalidades

Es una Grabadora sísmica, llamada *Geode Ultra-Light Exploration Seismograph* (Ver Imagen 1 y 2) desarrollada por la empresa *Geometrics*. Es la nueva generación de sistemas de grabación de datos sísmicos, la cual combina las mejores características de los grabadores sísmicos tradicionales con la flexibilidad y conveniencia de un sistema distributivo. Es ideal para realizar ensayos como refracción, reflexión, monitoreo de terremotos, VSP, explosión, vibración, mediciones, estudios marinos, perfilado del sub-suelo e incluso para investigaciones tomográficas.



Imagen. 1. Geode Ultra-Light Exploration Seismograph (a)



Imagen. 2. Geode Ultra-Light Exploration Seismograph (b)

Especificaciones

- El ancho de banda de 20 kHz proporciona una resolución ultra alta y baja en frecuencias para monitoreo sísmico.
- Rango dinámico de 24 bits, baja distorsión e integrado con Geophone2, line testing2 y monitor de ruido.

- Su gasto energético es de muy baja potencia por lo que para su uso se necesita una batería de 12v.
- **Configuraciones:** 3, 6, 8, 12,16 o 24 canales en el campo y realización de pruebas en la intemperie operado desde el software Windows basado en 98 / NT4 / ME / W2K /XP1 o por el software de configuración avanzada de Geometrics.
- **Rango dinámico:** 144 dB (sistema), 110 dB (instantáneo, medido) a 2 ms, 24 dB.
- **Distorsión:** 0.0005% a 2 ms, 1.75 a 208 Hz.
- **Ancho de banda:** 1.75 Hz a 20 kHz. 0.6 y baja frecuencia DC (opción disponible).
- **Rechazo en modo común:** >100 dB a <= 100 Hz, 36 dB.
- **Diafonía:** -125 dB a 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms.
- **Ruido Planta:** 0.20 uV, RFI a 2 ms, 36 dB, 1.75 a 208 Hz.
- **Apilamiento de la precisión del gatillo:** 1/32 del intervalo de muestra
- **Señal de entrada máxima:** 2.8 V PP, 0 dB.
- **Ganancias del preamplificador:** La configuración estándar.
- **Filtro anti alias:** -3 dB al 83% de la frecuencia Nyquist, hasta 90 dB.
- **Adquisición y display de filtros:** Corte bajo: SALIDA, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz, 24 o 48 dB / octava Butterworth. Ancho de banda 2% de la frecuencia central. High cut: OUT, 32, 64, 125, 250, 500 o 1000 Hz, 24 o 48 dB /octava.
- **Intervalo de muestra:** 0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms.
- **Longitud de registro:** 16.384 muestra estándar, 65.536 muestras opcionales.
- **Pre- trigger data:** Hasta la longitud total del registro.
- **Retardo:** 0 a 100 segundos en pasos de 1 intervalo de muestreo.
- **Trasmisión de datos:** Utiliza una transmisión estándar de Ethernet sobre CAT5 cobre o multimodal de fibra óptica. Distancia entre cajas: CAT 5 cable de hasta 0.25 km; cable de fibra óptica de hasta 1.5 km.
- **Grabación continua:** Disponible para monitorización de vibraciones.
- **Canales Auxiliares:** Todos los canales Geode se pueden programar como AUX o datos.
- **Prueba de línea:** El monitor de ruido en tiempo real muestra la salida del Geófono de prueba opcional, ayuda a identificar Geófonos y cables en cortocircuito o rotos.

Partes del *Geode*

Batería

Es una batería recargable de 12 voltios con una duración aproximada de 8 horas dependiendo de su uso, con su respectivo cable de conexión al *Geode* (Ver Imagen 3, 4 y 5).



Imagen. 3. Batería de 12 voltios.

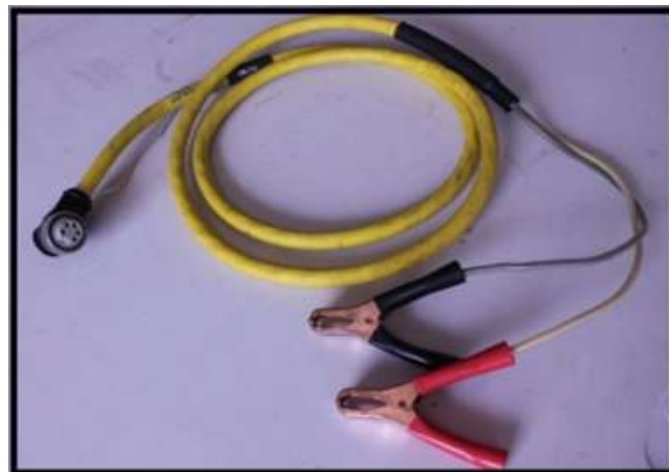


Imagen. 4. Cable Batería – Geode.

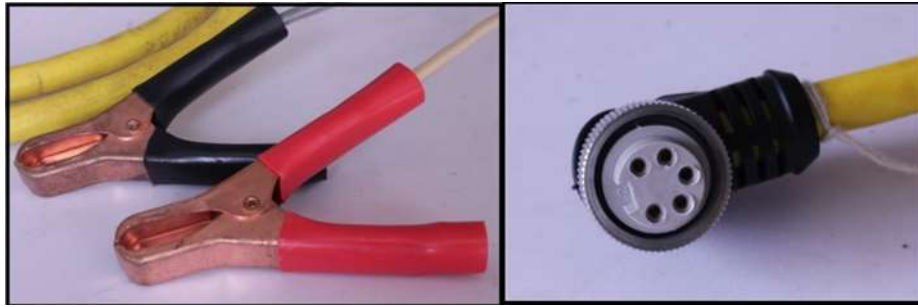


Imagen. 5. (a) Conector tipo pinza, (b) Conector tipo hembra.

Las respectivas conexiones de la batería se muestran en el inciso 3.1. (Ver Imagen 22 y 32).

Trigger

El *Trigger* es un sensor cuya función es marcar el inicio del viaje de la onda, es decir, la onda en el tiempo cero para empezar el registro (Ver Imagen 6 y Figura 1).



Imagen 6. Porra más Trigger

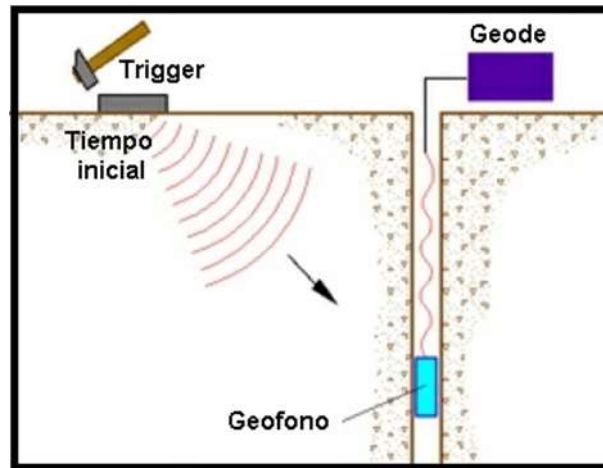


Figura 1. Tiempo inicial Trigger

Se muestra el cable de conexión *Trigger – Geode* con sus respectivos conectores (Ver Imagen 7, 8 y 9).



Imagen 7. Cable Trigger

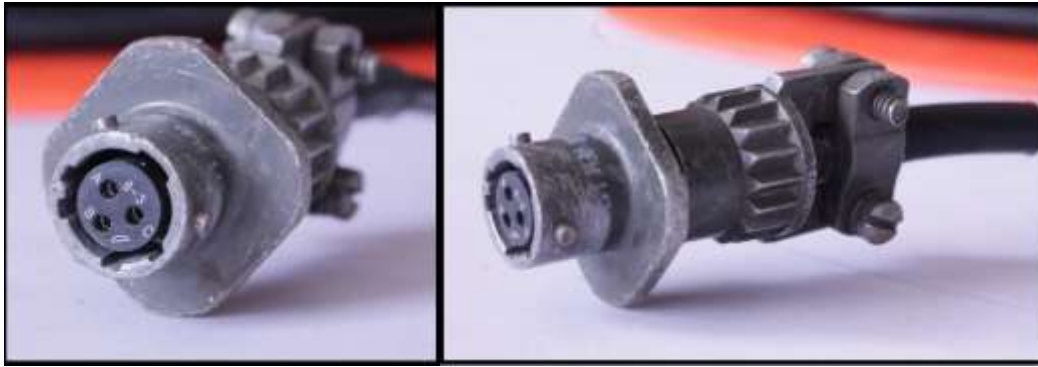


Imagen 8. Conector tipo hembra conexión a porra



Imagen 9. Conector tipo macho conexión a Geode

Las respectivas conexiones del *Trigger* se muestran en el inciso 3.1. (Ver Imagen 23 y 24).

Geode Laptop Adapter

En la siguiente imagen se muestra el *Geode Laptop Adapter*, el cual tiene como función transportar la información recolectada por el *Geode* a la computadora (Ver Imagen 10).

Presenta un interruptor con tres funciones:

Batery test: Para comprobar un adecuado funcionamiento de la batería se mueve el interruptor hacia la derecha (se enciende el bombillo de color azul).

Enable power up: Para permitir el paso de datos desde el Geode a la computadora se mueve el interruptor hacia la izquierda.

Enable power down: Para apagar el adaptador se deja el interruptor en la mitad.

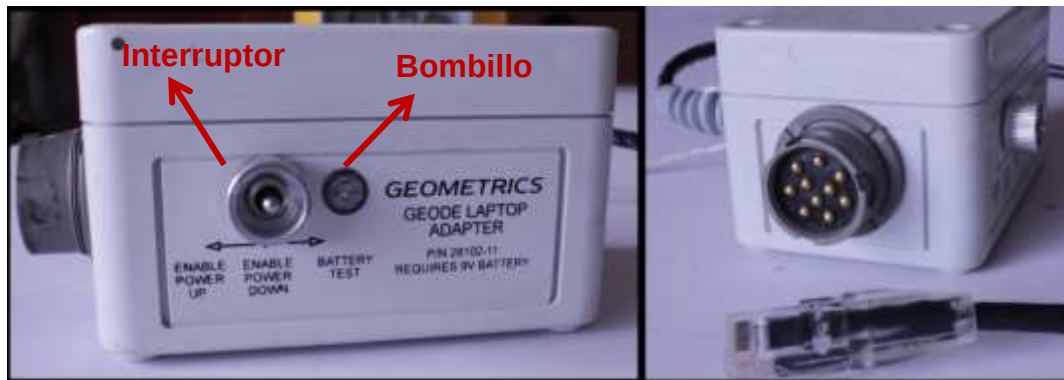


Imagen 10. Geode Laptop Adapter.

Se muestra el cable de conexión *Geode Laptop Adapter – Geode* con sus respectivos conectores (Ver Imagen 11).



Imagen 11. Cable Geode Laptop Adapter.

Las respectivas conexiones del *Geode Laptop Adapter* se muestran en el inciso 3.1. (Ver Imagen 25 y 26).

Geostuff Wall-Lock Borehole Geophone

Generalidades

Este equipo es una caja de control utilizada para Geófonos de perforación, la cual conectada con el *Geode ultra-light Exploration Seismograph* nos permite trabajar ensayos tales como el *Down Hole* y *Cross Hole* para la recolección de tiempos de onda (Ver Imagen 12).



Imagen 12. Geostuff Wall-Lock Borehole Geophone.

Partes del *Geostuff*

Panel de control

Este es el panel de control del *Geostuff*, el cual nos permite el manejo del Geófono triaxial (Ver Imagen 13).



Imagen 13. Tablero de manejo Geostuff (BHGC-4)

- a. **CLAMP:** Conecta la alimentación al motor de la abrazadera (Ver Imagen 16), que extenderá el resorte, sujetando el Geófono contra la pared del sondeo.

Nota:

- Es indispensable sujetar el geófono a la pared del sondeo, ya que este debe permanecer inmóvil durante la toma de datos.
 - El mecanismo de fijación es muy fuerte. No continuar aplicando potencia después de que la corriente se acerca 1 amperio (ver ítem f). Puede doblar el resorte o dañar las partes mecánicas del geófono.
- b. **RELEASE:** Conecta la alimentación al motor de la abrazadera, que contraerá el resorte, aflojando el geófono a la pared del sondeo.
- c. Aquí va conectado el cable al geófono triaxial (*Borehole Geophone*) (Ver Inciso 2.2.2.2.).
- d. Aquí va conectado el *External Power* (Ver Inciso 2.2.2.3.).
- e. Aquí va conectado el cable que nos permite enlazar el *Geostuff* con el *Geode* (Ver Imagen 14 y 15).



Imagen 14. Cable conexión Geostuff – Geode

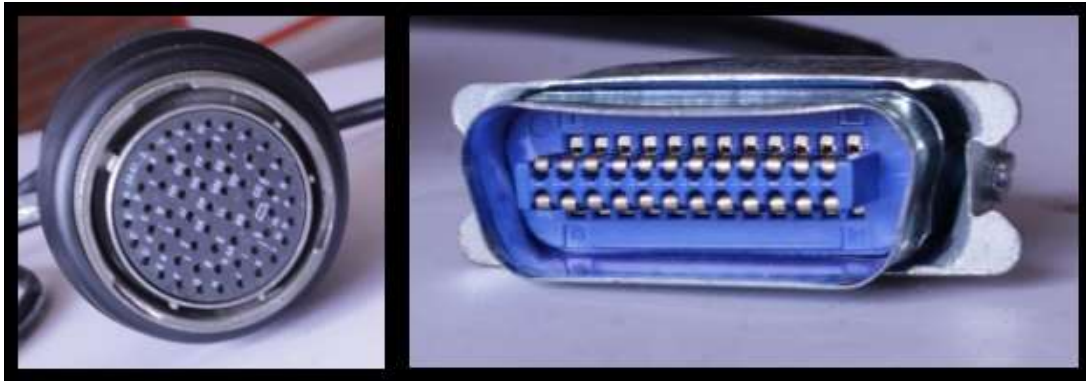


Imagen 15. (a) Conector tipo hembra conexión a Geode, (b) Conector DB conexión a Geostuff

Las respectivas conexiones del *Geostuff* al *Geode* se muestran en el inciso 3.1. (Ver Imagen 27) y en el inciso 3.2. (Ver Imagen 28).

- f. El Geostuff cuenta con un medidor de corriente el cual permite monitorear la potencia ejercida por la abrazadera.

Geófono Triaxial

Su función es actuar como receptor de las ondas emitidas al momento de golpear la platina ubicada en el suelo (Ver Imagen 16).



Imagen 16. Geófono Triaxial.

Se muestra el cable de conexión *Geostuff* – Geófono con sus respectivos conectores (Ver Imagen 17 y 18).



Imagen 17. Cable Geostuff-Geófono.

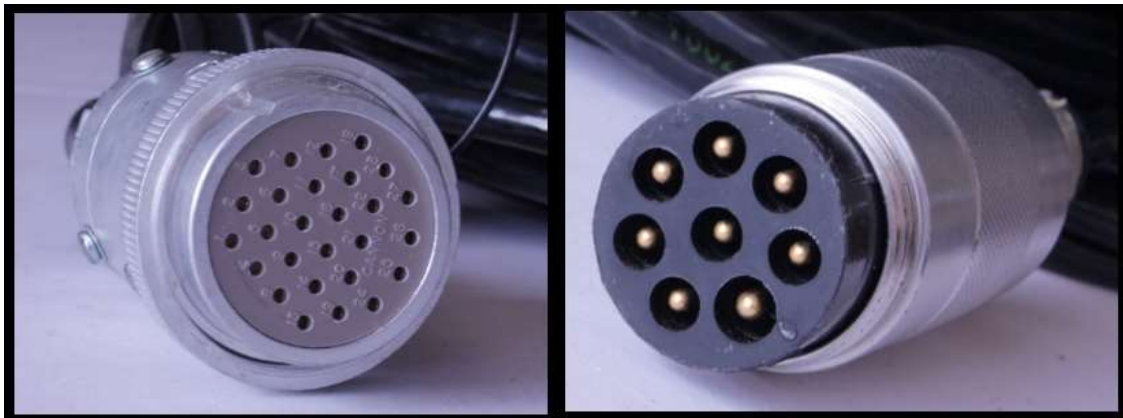


Imagen 18. (a) Conector tipo hembra conexión a Geostuff, (b) Conector tipo macho conexión a Geófono.

Las respectivas conexiones del Geófono se muestran en el inciso 3.2. (Ver Imagen 30 y 31).

External Power

Este es el encargado de entregarle energía al Geostuff (Ver Imagen 19).

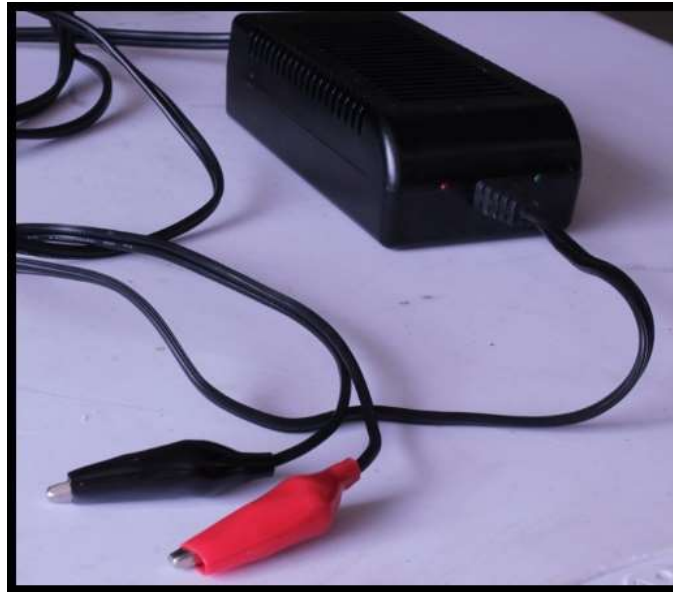


Imagen 19. External Power.

Las respectivas conexiones del *External Power* se muestran en el inciso 3.2. (Ver Imagen 29 y 33).

Instalación de los equipos

En esta sección del manual se describirá paso a paso la instalación de los equipos para el correspondiente ensayo (*Down Hole*).

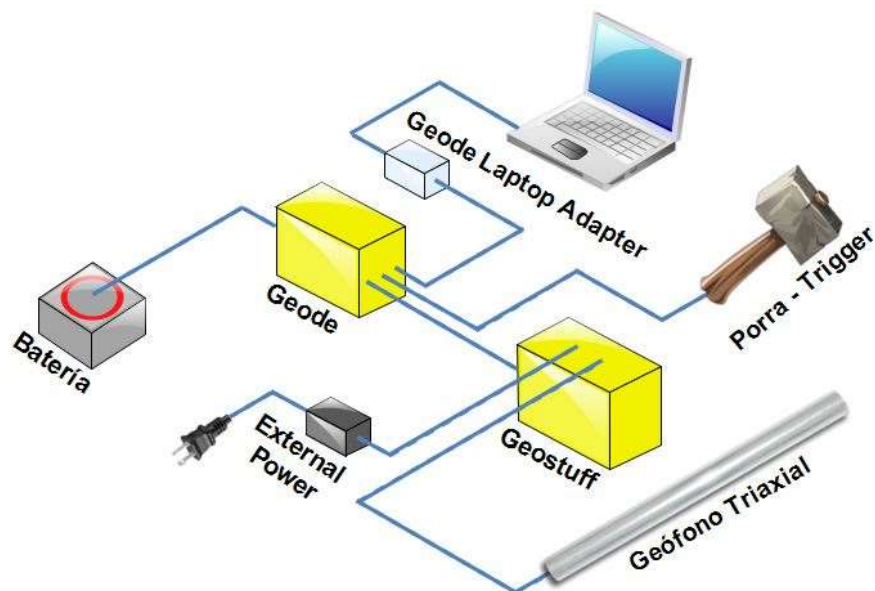


Figura 2. Ilustración conexión completa.

Instalación del Geode

A continuación se muestra los diferentes conectores del equipo Geode.

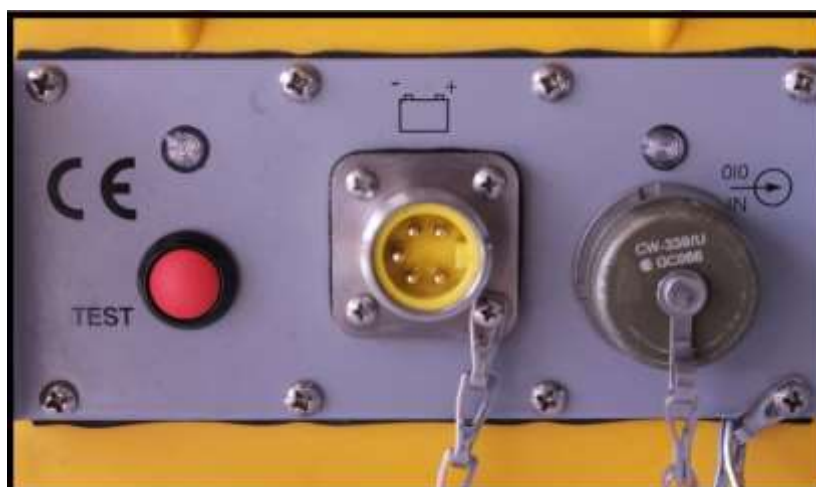


Imagen 20. Conectores Geode (a)



Imagen 21. Conectores Geode (b)

Empezamos conectando el cable de la batería (Ver Imagen 4 y 5 (b)) al *Geode* (Ver Imagen 22).

Nota: es importante tener en cuenta que solo se conectará el cable sin conectar la batería, ya que por seguridad del equipo lo último en conectar será la batería.



Imagen 22. Conexión batería.

Ahora procedemos a conectar el cable *Trigger* (Ver Imagen 7, 9 y 23).



Imagen 23. Conexión cable Trigger.

Al otro extremo del cable *Trigger* se conecta la porra (Ver Imagen 8 y 24).



Imagen 24. Conexión porra.

Ahora se conecta el cable del *Geode Laptop Adapter* al *Geode* (Ver Imagen 11 y 25).



Imagen 25. Conexión cable Geode Laptop Adapter.

Y así mismo, este cable se conecta al *Geode Laptop Adapter* (Ver Imagen 10 y 26).



Imagen 26. Conexión Geode Laptop Adapter

Ahora se conecta el cable *Geode – Geostuff* (Ver Imagen 14, 15 (a) y 27).



Imagen 27. Conexión cable Geode – Geostuff.

Instalación del *Geostuff*

A continuación se mostrará la conexión al *Geostuff* (Ver Imagen 15 (b) y 28).



Imagen 28. Conexión Geode – Geostuff.

Seguido se conecta el cable *External Power* al *Geostuff* (Ver Imagen 19 y 29).

Nota: es importante tener en cuenta que solo se conectará el cable sin conectarlo a una fuente de poder.



Imagen 29. Conexión External Power.

Ahora se conecta el cable del Geófono al *Geostuff* (Ver Imagen 17, 18 (a) y 30).



Imagen 30. Conexión cable Geófono.

Y dicho cable es conectado al Geófono (Ver Imagen 17, 18 (b) y 31).



Imagen 31. Conexión Geófono.

El conector debe lubricarse con silicona u otro lubricante para prevenir dañar el plástico, los hilos de acero inoxidable debe tener una pequeña cantidad de anti-seize compuesto aplicado para evitar que los conectores se dañen entre ellos mismos.

Por último se procede a conectar las fuentes de poder (Ver Imagen 32 y 33).



Imagen 32. Conexión Batería.



Imagen 33. Conexión External Power a toma corriente.

Toma de datos

En esta tercera parte del manual se describirá el paso a paso en campo, tanto del equipo, como del software *Geometrics Seismodule Controller*.

Proceso en software

- **Paso 1. Interfaz del software**

En primera instancia abrimos el software *Geometrics Seismodule Controller* (Ver Figura 3 y 4).



Figura 3. Icono del programa Geometrics Seismodule Controller.

Por medio de este programa se obtienen los datos del tiempo que tarda en llegar la onda P y S al Geófono triaxial, y teniendo en cuenta la profundidad de este, se calculan las velocidades de onda en el subsuelo.



Figura 4. Abrir programa Geometrics Seismodule Controller.

En la siguiente imagen se presenta la interfaz que muestra el software siempre y cuando estén conectados todos los equipos correctamente. Se verifica el funcionamiento del geófono triaxial por medio de golpes suaves cerca de este, mirando desde el monitor si se detectan perturbaciones en las líneas verticales en el panel del ruido (Ver figura 5).

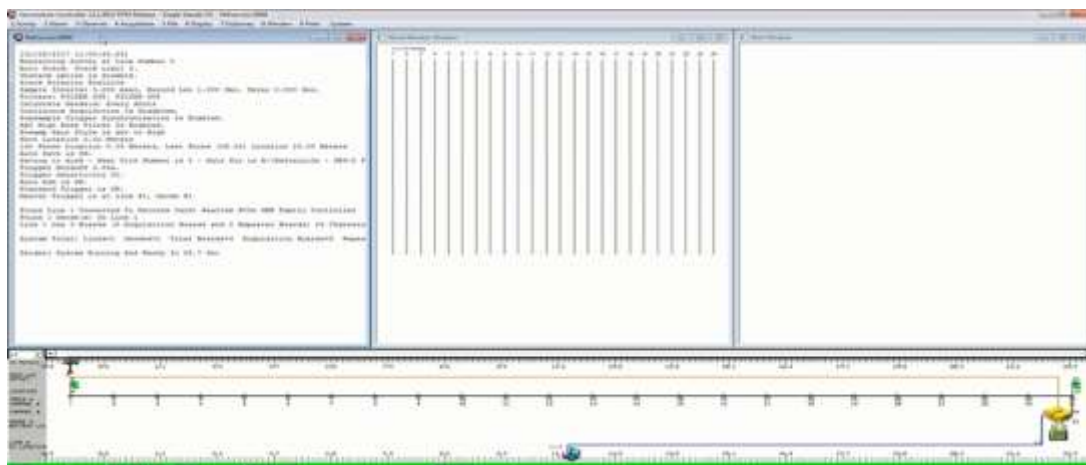


Figura 5. Interfaz del programa Geometrics Seismodule Controller.

Se configura el software según el tipo de ensayo requerido para el estudio, realizando modificaciones en distancias, tiempos de toma de datos, número de golpes, ubicación del disparador, conforme al ensayo que se desee realizar como: (Refracción, MASW 1D, MASW 2D, REMI). Para este caso se realiza el ensayo *Down Hole*. Para la realización de esta configuración se continúa con los siguientes pasos:

- **Paso 2. New Survey**

En esta herramienta procedemos a crear un nuevo proyecto en el cual vamos a trabajar, en este caso lo llamaremos “*Downhole*” (Ver figura 6).

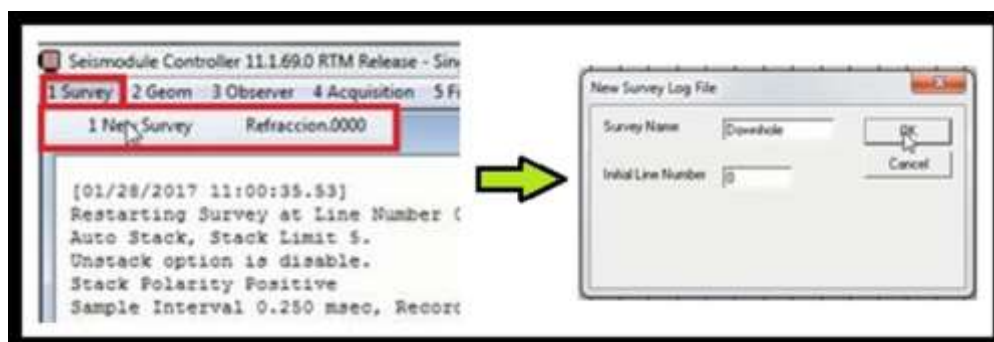


Figura 6. Nuevo proyecto.

- **Paso 3. Survey Mode**

En esta herramienta seleccionamos el tipo de ensayo que vamos a realizar; para este caso, el *Down Hole*, seleccionamos a la casilla “Other” (Ver figura 7).

Para ensayos tales como *Cross Hole* y *Up Hole* también se selecciona la opción “Other”.

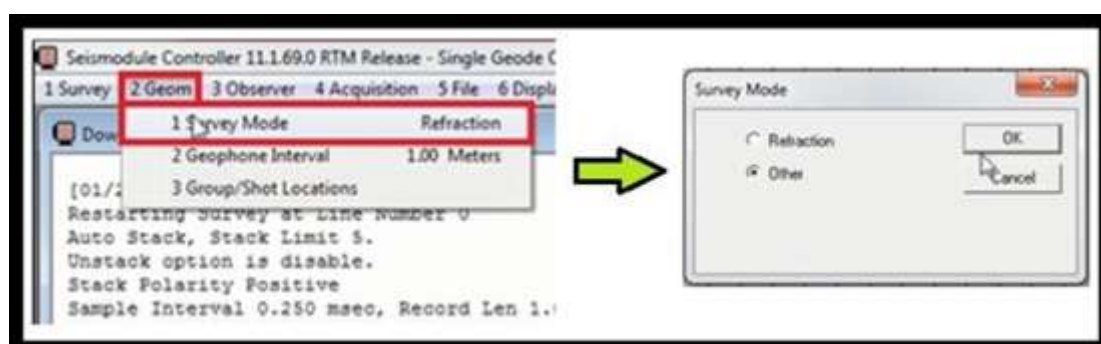


Figura 7. Tipo de ensayo.

- **Paso 4. Geophone Interval**

Aquí podremos indicarle al software de cada cuanto será la distancia entre mediciones; en este caso se realizarán cada metro de profundidad (Ver Figura 8 y 9).

La decisión de escoger intervalos de cada metro es un criterio del usuario; dependiendo de la profundidad del sondeo, en este caso, tiene una profundidad de 8 metros, por lo cual se toman 8 muestras de datos (para mayor eficiencia reducir el intervalo y así aumentar el número de datos).

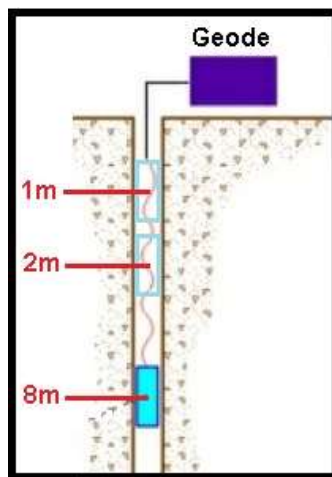


Figura 8. Distancia Vertical sondeo.

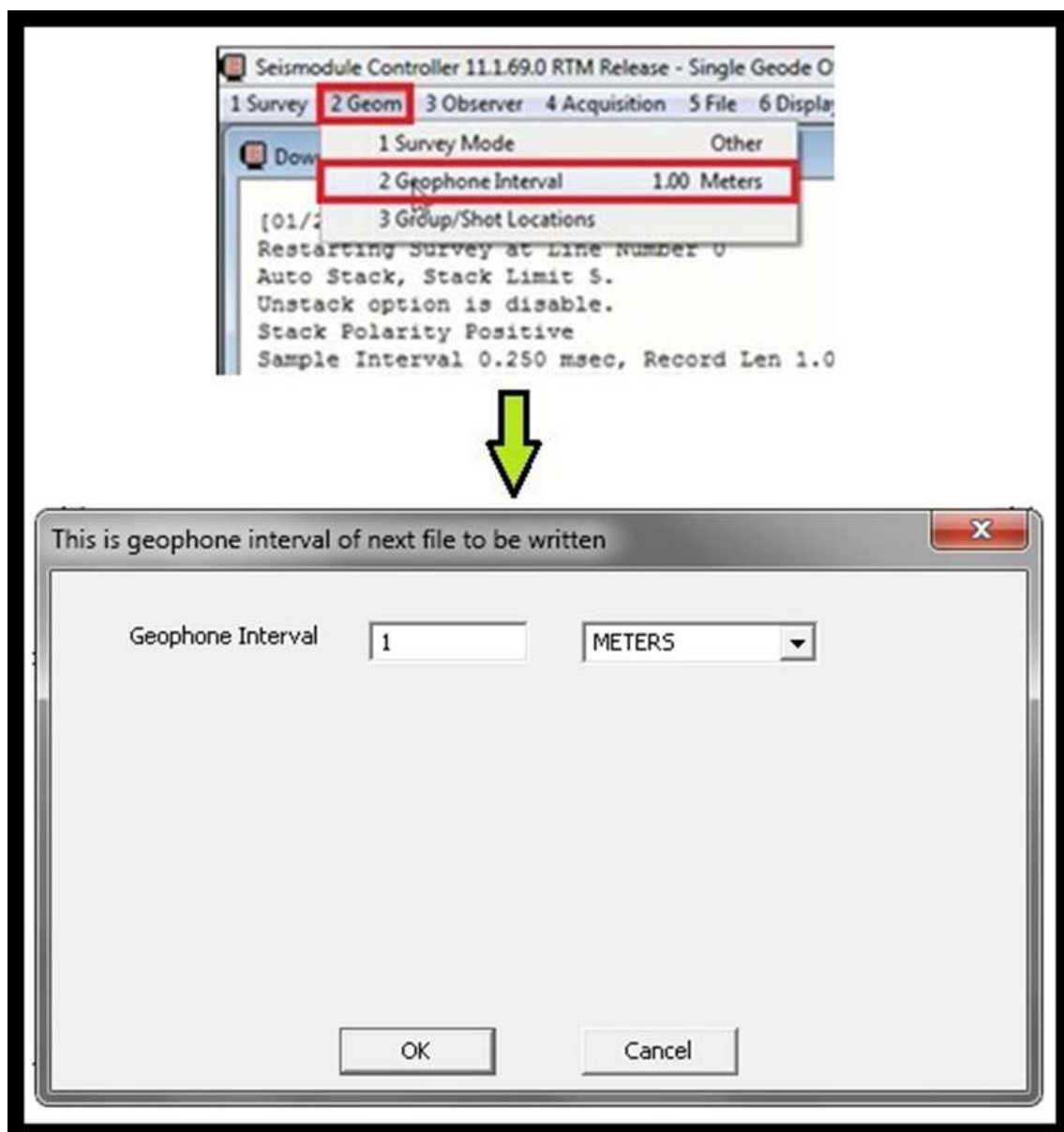


Figura 9. Intervalo de profundidad (mediciones).

- **Paso 5. *Group/Shot Locations***

Indicamos la distancia horizontal “ d ” (*Shot coordinate*) entre el emisor (*Trigger*) y el receptor (Geófono).

Para este caso se asignó una distancia de 0.5 metros. (Ver Imagen 34 y Figura 10 y 11).

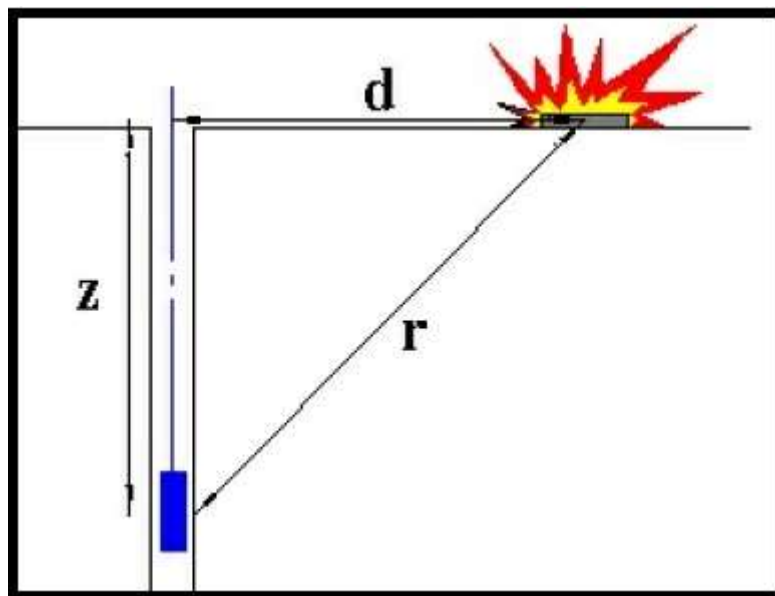


Figura 10. Distancia horizontal “ d ”.

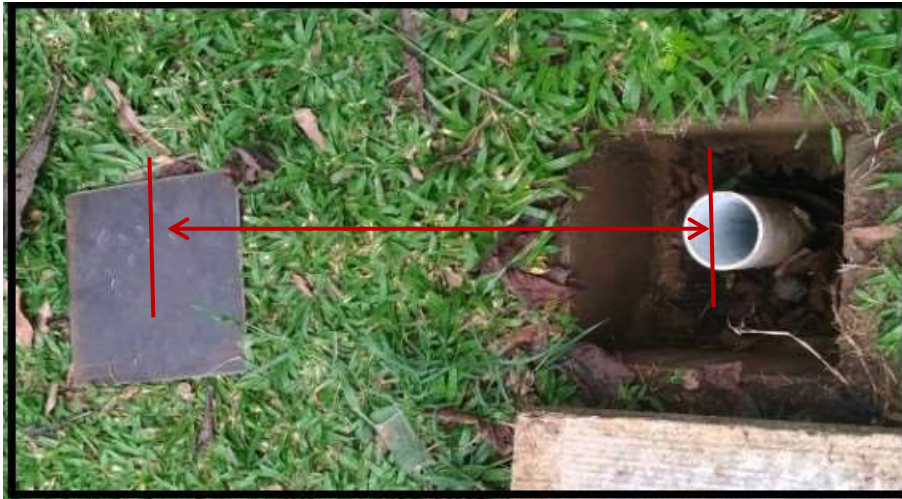


Imagen 34. Distancia platina-sondeo.

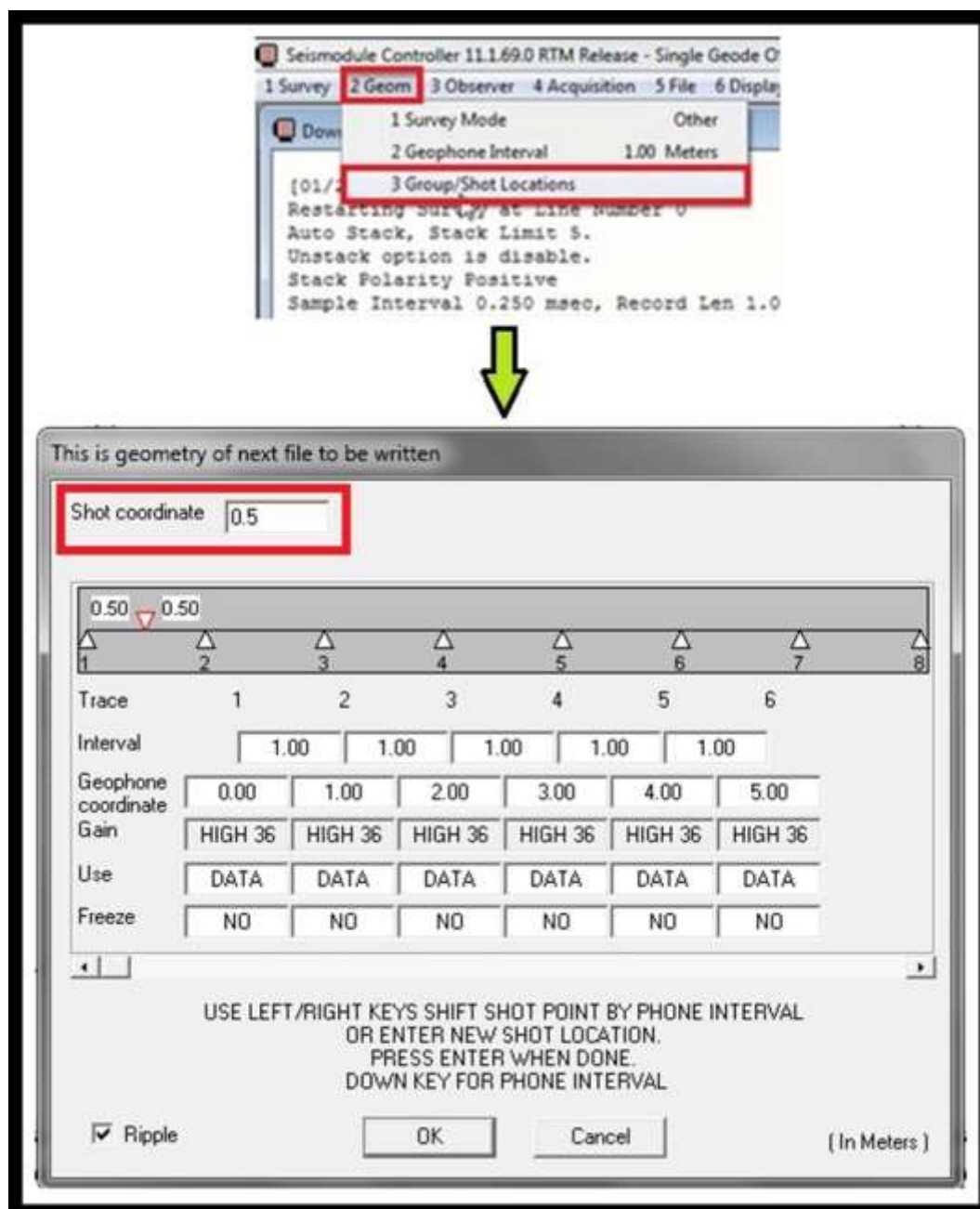


Figura 11. Ubicación del disparador.

- **Paso 6 (opcional). Observer**

La herramienta número 3 “Observer” nos permite agregar una descripción más detallada acerca del ensayo, por ejemplo, nombre del ensayo, fecha de realización, lugar de realización, autores, observaciones, etcétera.

- **Paso 7. *Sample Interval/Record Length***

Aquí se indica el tiempo que tarda en llegar la información de cada golpe al software (Ver Figura 12).

Para este caso se asignó un valor de 1 segundo (*Record Length*), quiere decir que los datos se van a tardar 1 segundo en llegar a la computadora.

La casilla *Sample Interval* sirve para fraccionar la toma de datos, es decir, el segundo en que tardan los datos en llegar a la computadora es fraccionado en intervalos, en este caso se tomaron intervalos de 0.25 milisegundos, esto sirve para la capacidad de RAM de la computadora; entre mayor sea el tiempo de cada intervalo, menor será el esfuerzo que realice la computadora para la recolección de datos.

La casilla *Delay* se le asignó un valor de cero segundos, esto sirve para indicar que al momento de realizar el golpe en la platina el software tome los datos relacionados solamente para ese golpe. Esto es útil en situaciones en que el usuario por error no hace un golpe en seco, es decir, al momento de golpear la platina, esta rebota y vuelve a caer, haciendo un segundo golpe, lo cual no sería ideal para la toma de datos.

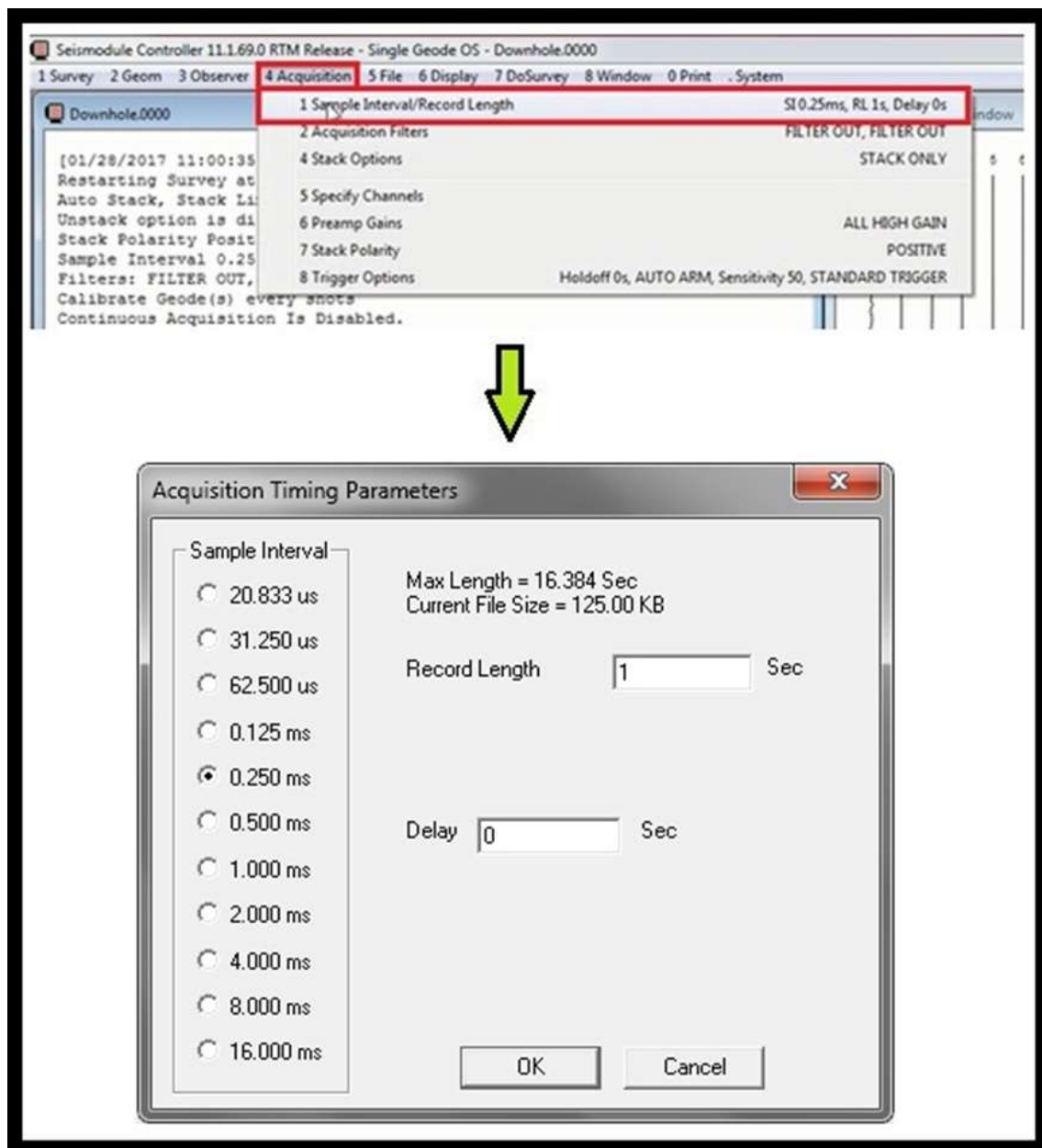


Figura 12. Tiempo de recolección de datos.

- **Paso 8. Stack Options**

Se procede ahora a indicar cuantos golpes se realizaran por cada toma de información, en este caso se realizaron 5 golpes (Ver Figura 13).

La casilla *Auto Stack* sirve para indicarle al software que después de cada 5 golpes guarde automáticamente los datos.

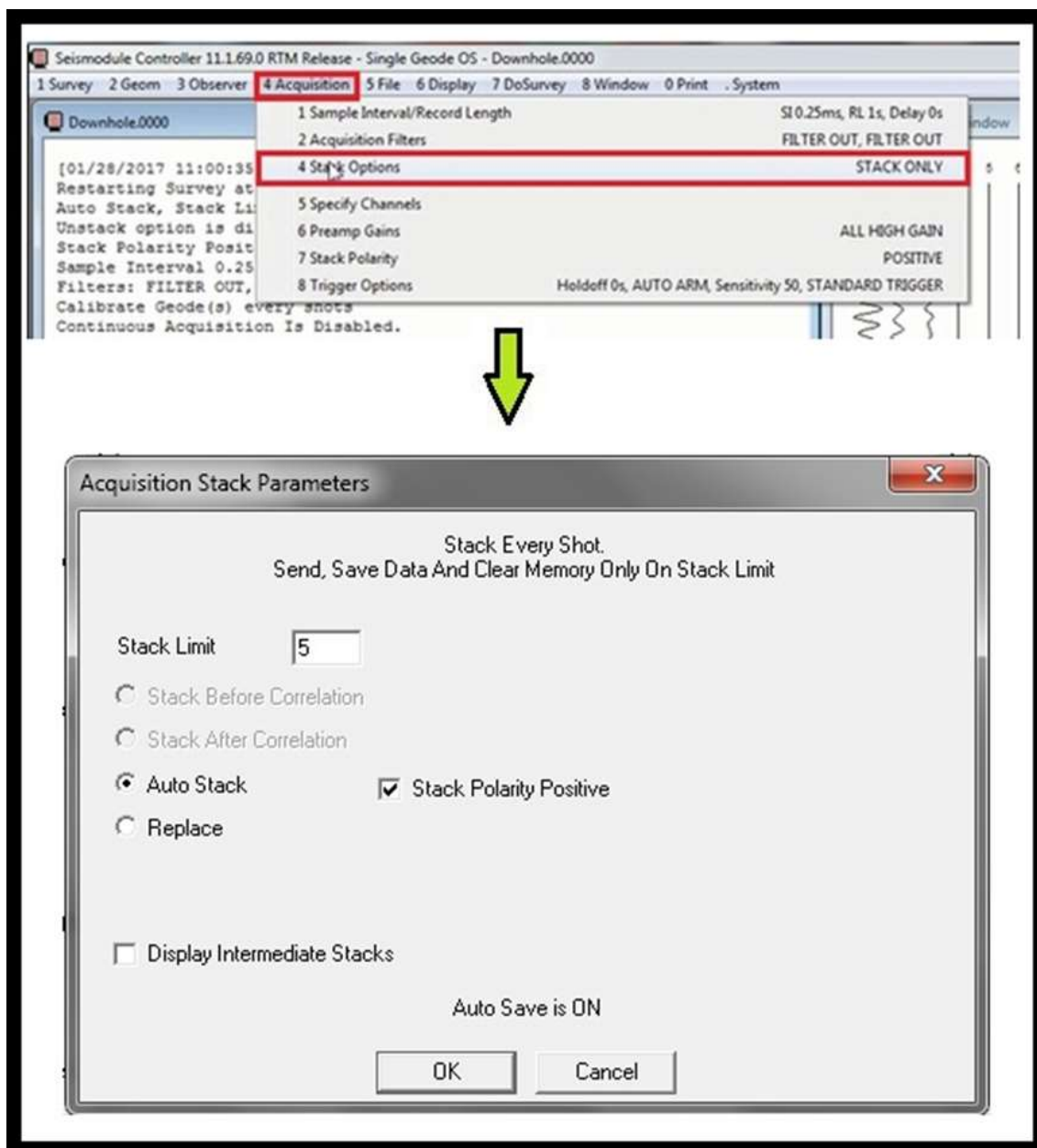


Figura 13. Numero de golpes

- **Paso 9. Specify Channels**

Debido a que utilizaremos un geófono triaxial debemos deshabilitar las ultimas 3 casillas de la fila “Use”; ubicamos el mouse en la cuarta casilla y oprimimos el número “4” que da el comando para deshabilitar los demás canales (INACTIVE) (Ver Figura 14).

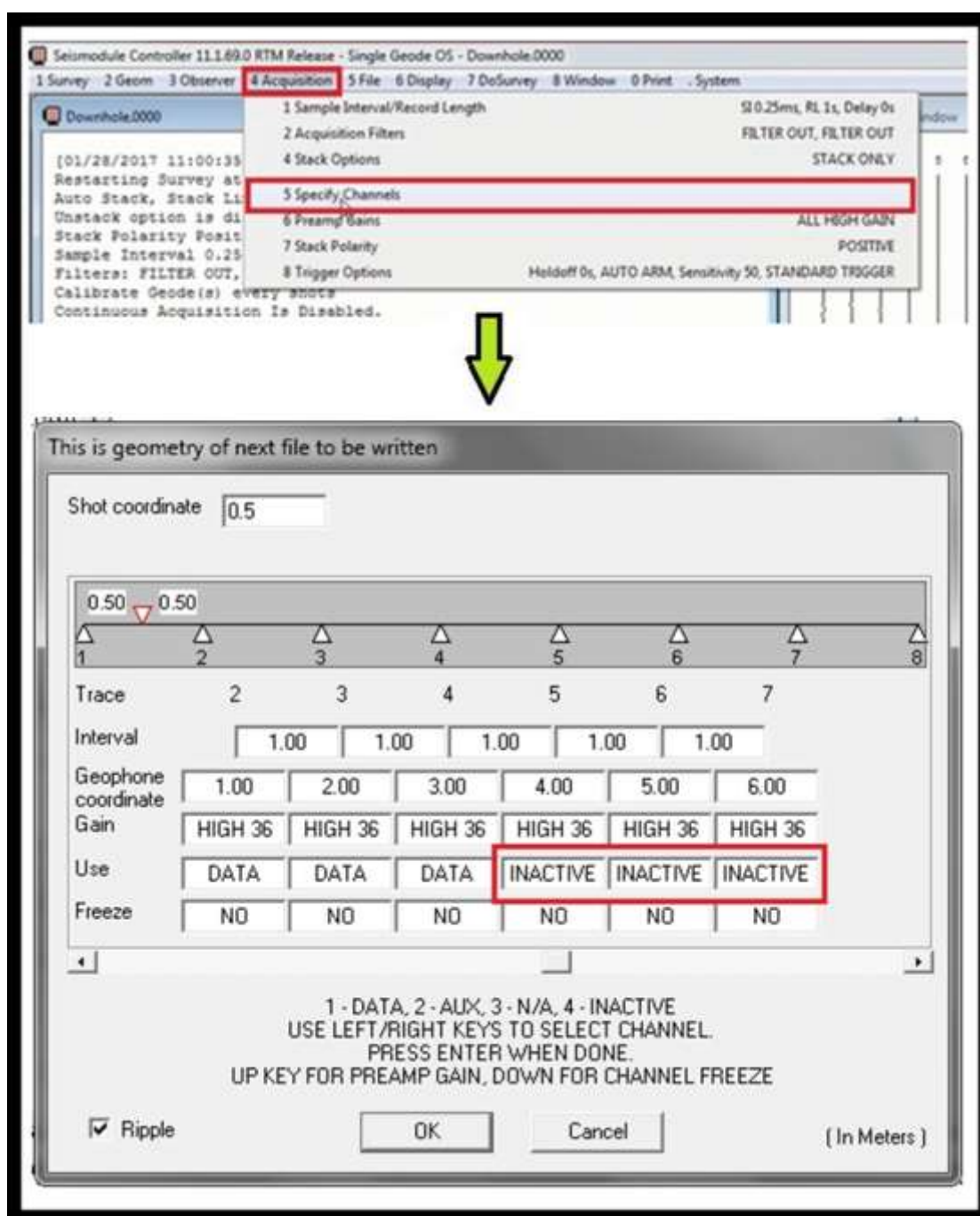


Figura 14. Uso del geófono triaxial.

- **Paso 10. Preamp Gains**

A continuación se le asigna la ganancia que tiene cada golpe, para este caso se asignó “All High Gain” lo cual significa que la ganancia será distribuida uniformemente en el geófono y tomara las perturbaciones en el ambiente (sonidos de alta frecuencia) (Ver Figura 15).

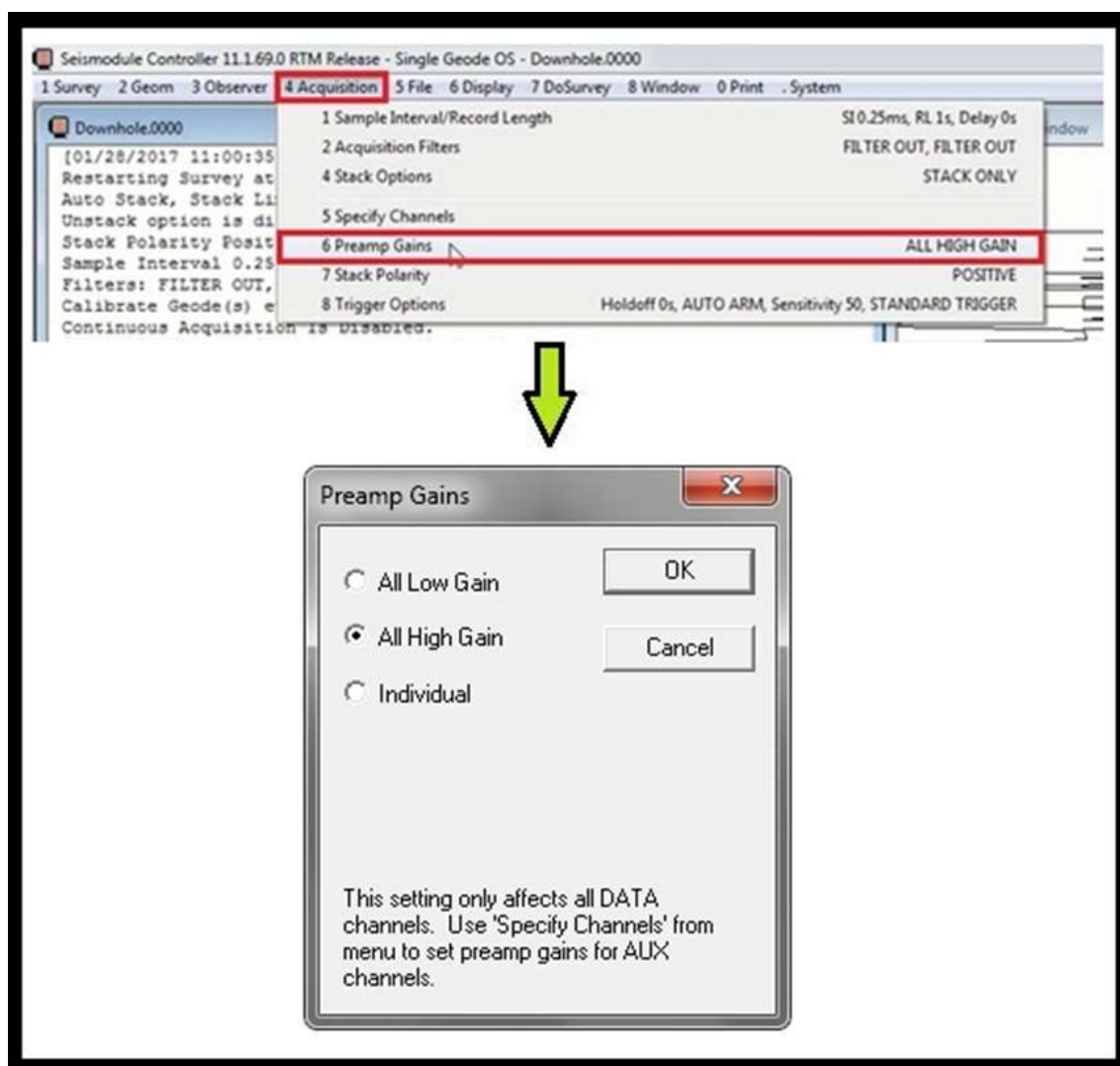


Figura 15. Ganancia.

- **Paso 11. *Storage Parameters***

Ahora procedemos a crear una carpeta en el ordenador en donde le indicaremos al software donde almacenar los datos recolectados (Ver Figura 16).

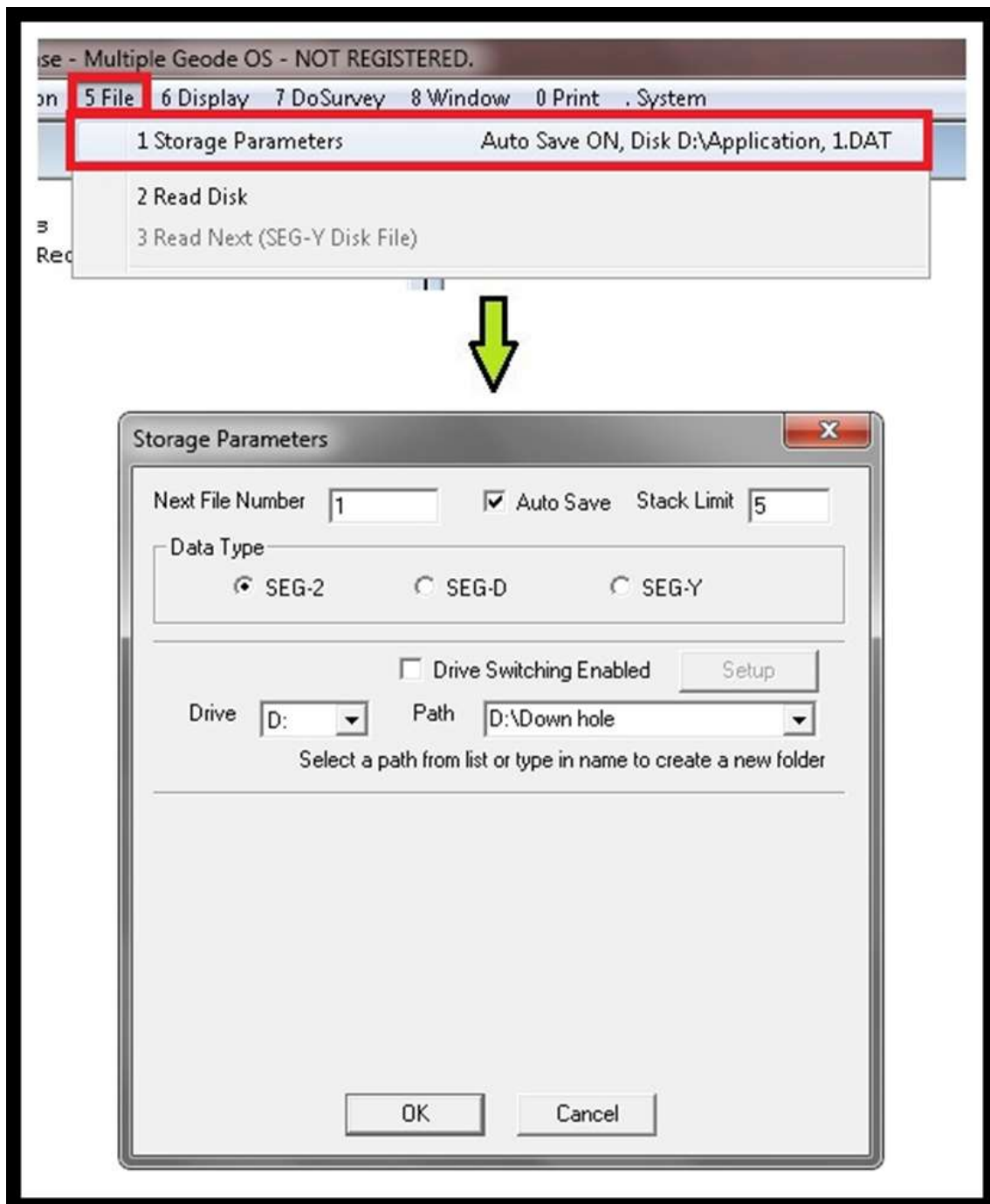


Figura 16. Recolección de datos.

Proceso en campo

Una vez finalizada la configuración del software se procede a realizar el ensayo; la toma de datos en campo.

Se ubica el Geófono triaxial a la profundidad requerida (en este caso a cada 1 metro de profundidad) (Ver Imagen 35, 36 y 37).



Imagen 35. Sondeo.



Imagen 36. Colocación Geófono.

Una vez este el Geófono en el sondeo se ajusta la abrazadera tal y como se indica en el inciso 2.2.2.1. (a).



Imagen 37. Geófono en sondeo.

Ahora se procede a obtener las ondas P y S. Este proceso consiste en golpear el suelo de tal manera que se produzca una perturbación en este. Entre más grande sea la perturbación, a mayor distancia viajara la onda y con mayor intensidad, por esta razón se emplea una platina metálica, de tal forma que la intensidad de la onda es mayor en comparación a golpear el suelo directamente. Esto es importante para cuando el sondeo tenga profundidades muy altas, ya que la onda debe viajar una mayor distancia.

Para obtener la onda P la platina debe ser golpeada horizontalmente (Ver Imagen 38).



Imagen 38. Golpe onda P.

Y para obtener la onda S la platina debe ser golpeada verticalmente (Ver Imagen 39).



Imagen 39. Golpe onda S.

- **Nota:**

El software detecta las perturbaciones del suelo, toma los datos y los guarda automáticamente, por esta razón es recomendable realizar el ensayo sin que hayan otras perturbaciones externas, tales como, vehículos, lluvia, e incluso peatones; el sensor del Geófono es tan potente que puede detectar los pasos de los peatones.

Se golpea la platina 5 veces por metro para cada onda, es decir, 10 golpes por metro; 5 para la onda P y 5 para la onda S. el sondeo en estudio tiene una profundidad de 8 metros, es decir, en total se hicieron 80 golpes.

Como se le asignó al software que se realizarían 5 golpes para cada onda, este guarda los 5 golpes en 1 archivo, como fueron 80 golpes, tendremos en total 16 archivos de información (Ver Figura 19). Cada vez que se realizan 5 golpes, el software guarda automáticamente este archivo y le avisa al usuario haciendo un sonido similar a un claxon, dando aviso de que fue guardado satisfactoriamente y se puede proceder a realizar los siguientes 5 golpes

Una vez realizados los 10 golpes en total para el primer metro, se suelta el Geófono tal y como se indica en el inciso 2.2.2.1. (b). Ahora se ubica a Geófono a dos metros de profundidad, se vuelve a ajustar y se realiza el mismo procedimiento mencionado anteriormente.

El equipo no tiene limitación en la toma de datos, es decir, este puede tomar tantos datos como el usuario desee, lo que restringe la toma de datos serian factores tales como la capacidad de memoria de la computadora o que el Geófono haya llegado hasta el final del sondeo.

Procesamiento de datos

En esta parte del manual se describirá el paso a paso del procesamiento de datos de los programas o módulos:

Pickwin (Pick First Break for Dispersion  *curves)*

PSlog (Downhole  *Seismic)*

- **Paso 1. Abrir *Pickwin***

Se comienza con abrir *Pickwin*.

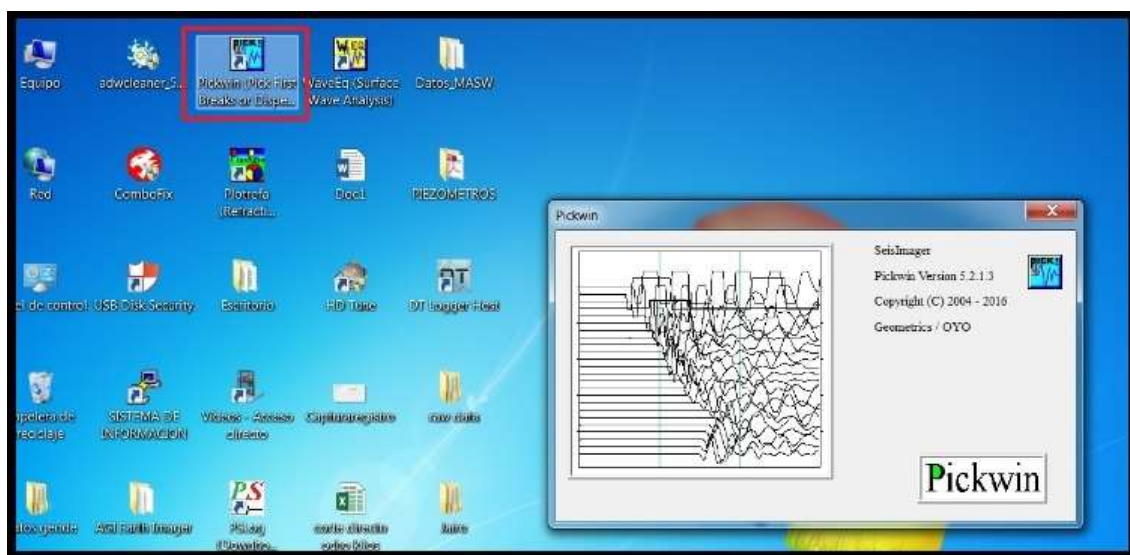


Figura 17. Selección del programa Pickwin.

- **Paso 2. Selección Down Hole**

En él se hace el picado de las ondas P y S. Ir a *Downhole Seismic analysis (D)* y luego *Make downhole group (file list)*.

Es de elección del usuario procesar las ondas P y S juntas o hacer el proceso individual para cada una de ellas.

En este caso se procesa P y S por separadas.



Figura 18. Selección ensayo Downhole.

- **Paso 3. Seleccionar datos**

En *Make downhole group* se elige los (.dat). Pares para ondas P e impares para ondas S.

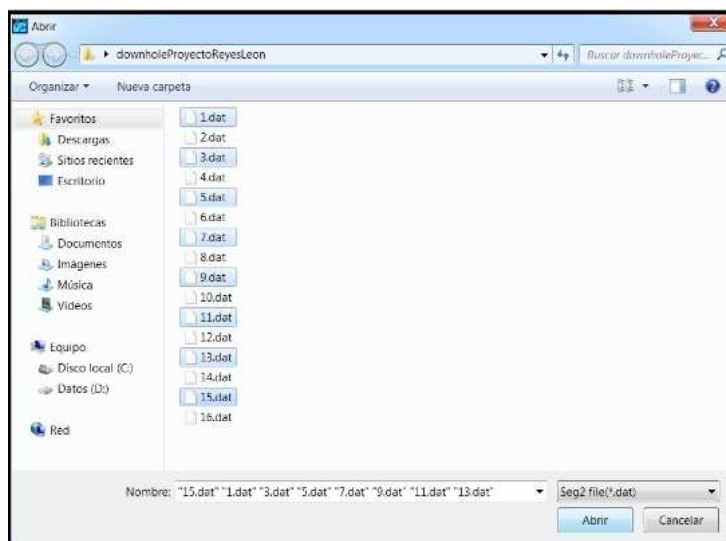


Figura 19. Selección del tipo de onda (P o S).

- **Paso 4. Set up downhole Survey geometry**

A continuación el programa nos preguntara como se hizo la toma de datos en el terreno a estudiar.

En *Survey geometry*, se marca la opción (*Single receiver with multiple shots*). Para recibir solo la información del primer golpe, sin el rebote de la porra.

En *Geometry* primero debemos decirle al programa a que profundidad se encuentra la primera toma de datos realizada, y como segundo el intervalo entre cada una de ellas.

Todas las demás opciones las dejamos sin marcar. Y (OK).

Set up downhole survey geometry

Survey geometry

- ☒ Single receiver with multiple shots
- ☐ Double receiver with multiple shots
- ☐ OYO suspension logger (P)
- ☐ OYO suspension logger (S)

Geometry

1st receiver m

Receiver increment m
(enter a negative value to decrement)

Source

- ☐ Analyze opposite direction shots together
- ☐ Both opposite direction shots for each depth are included in one file
- ☐ Analyze P-wave data together

OK

Cancel

Figura 20. Set up downhole Survey geometry.

- **Paso 5. Verificación de datos**

Nos saldrá la siguiente pantalla (ver figura 21) será la disposición del arreglo, sabiendo que en el archivo abierto la primera toma es de 1 metro, el segundo de 2 metros y así sucesivamente.

Index	Edit	ID	Depth (m)
0	☐	1	1
1	☐	3	2
2	☐	5	3
3	☐	7	4
4	☐	9	5
5	☐	11	6
6	☐	13	7
7	☐	15	8

Buttons: OK, Cancel, Next, Back, Delete, Export, Import

Number of files: 8

Figura 21. Verificación de datos.

- **Paso 6. Visualización de onda**

Una vez cargados los datos, se mostrara en pantalla las líneas de onda del primer metro del sondeo, donde cada línea corresponde a cada uno de los componentes del geófono triaxial.

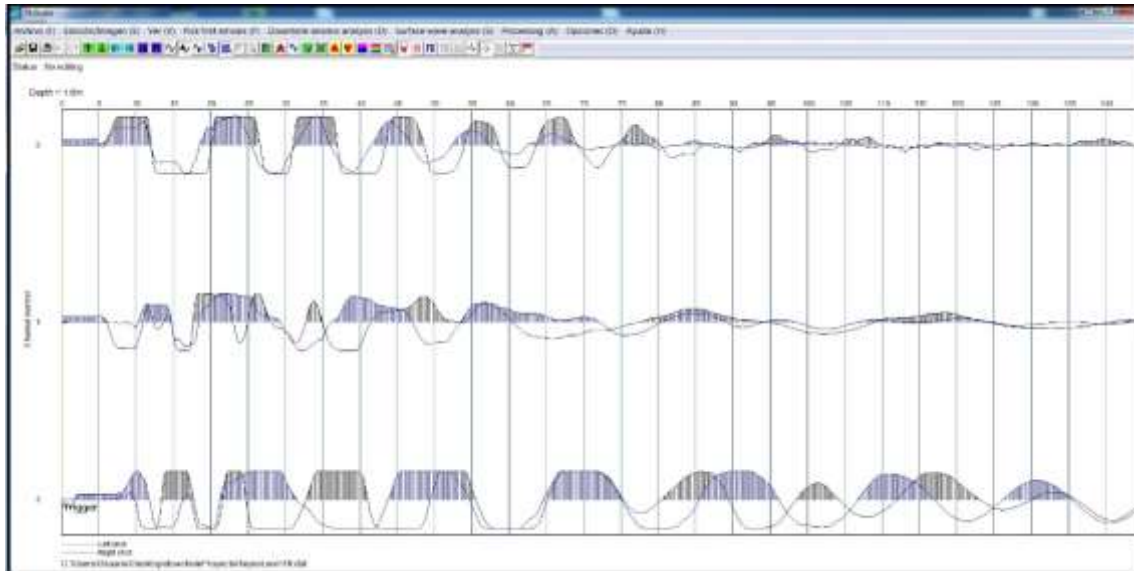


Figura 22. Visualización de onda.

Para poder y ver mejor las líneas de onda de cada archivo en profundidad utilizamos:



- **Paso 7. Visualización completa de onda**

Para visualizar el sismograma completo debemos ir a *Downhole seismic analysis*, luego *Set up channel components*.

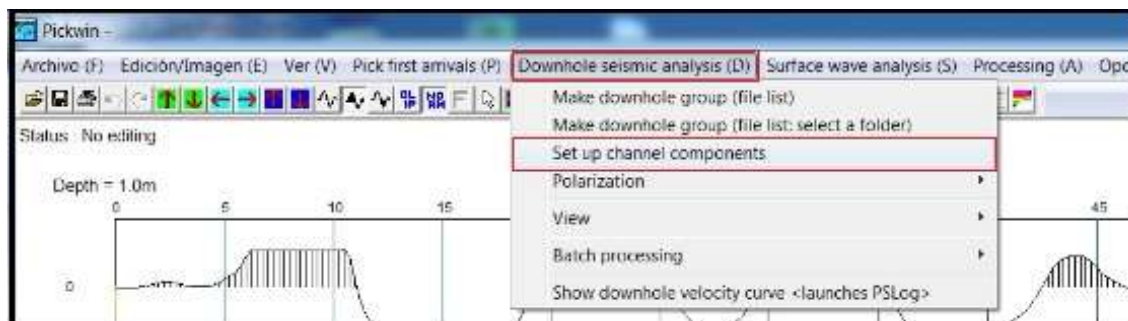


Figura 23. Visualización completa de onda (a).

1. Esta casilla le indica al programa la cantidad de canales en los cuales vamos a trabajar, en nuestro caso solo se analizara un sondeo.
2. Esta casilla nos indica las posiciones en la cual será golpeada la platina, en nuestro caso (onda P) golpeo perpendicular al sondeo.

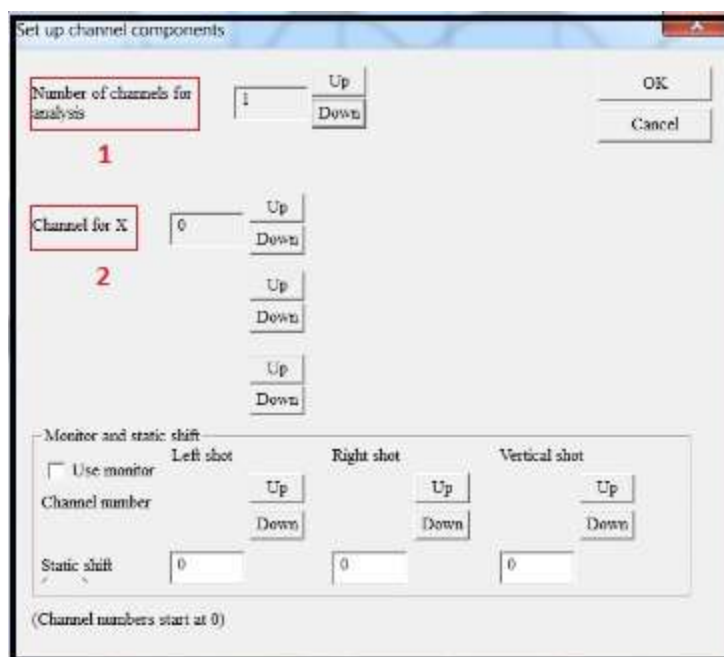


Figura 24. Visualización completa de onda (b).

Ya habiendo seguido los pasos anteriores se mostrara la ventana con todos los sismogramas:

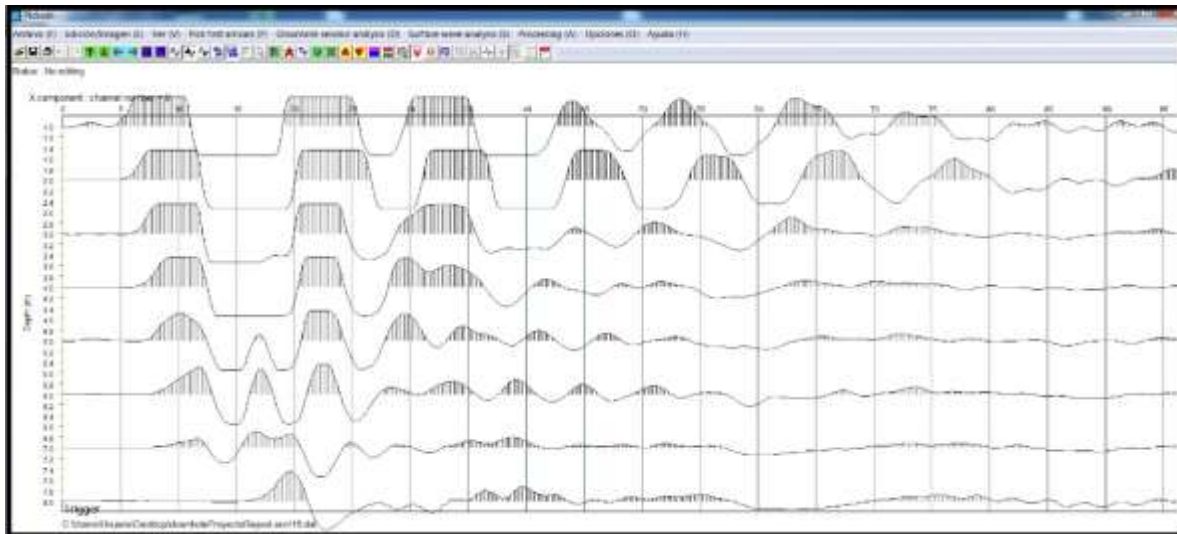


Figura 25. Visualización completa de onda (c)

- **Paso 8. Picado de onda**

Para comenzar a picar las primeras llegadas de las ondas (P o S) dependiendo con cual se inició el procesamiento, debemos ir a la opción *Pick First Arrival (P)*, *Pick first Breaks*.

Con estas  flechas: Tenemos la opción de aumentar o disminuir la amplitud de la forma de onda.

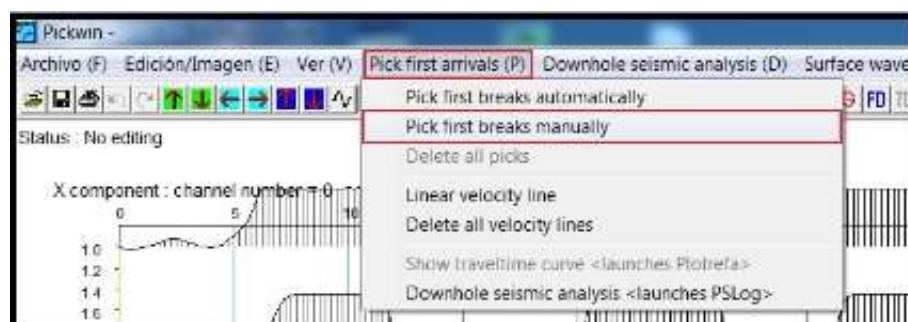


Figura 26. Picado de onda (P o S).

- **Paso 9. Seleccionar inicio de onda**

Ya habiendo picado todos los inicios de onda de la onda de compresión, voy a la opción *Downhole Seismic Analysis, show downhole velocity Curve*.

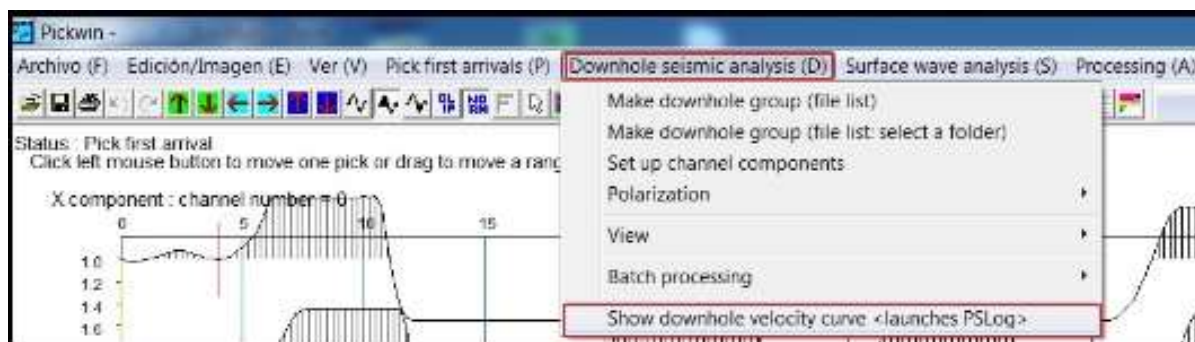


Figura 27. Selección primeras llegadas de la onda de compresión

- **Paso 10. Distancia generación de onda a geófono triaxial**

A continuación nos aparecerá la siguiente ventana de dialogo (ver figura 28) a la cual le indicaremos a que distancia paralela del suelo se encuentra la platina del geófono triaxial.

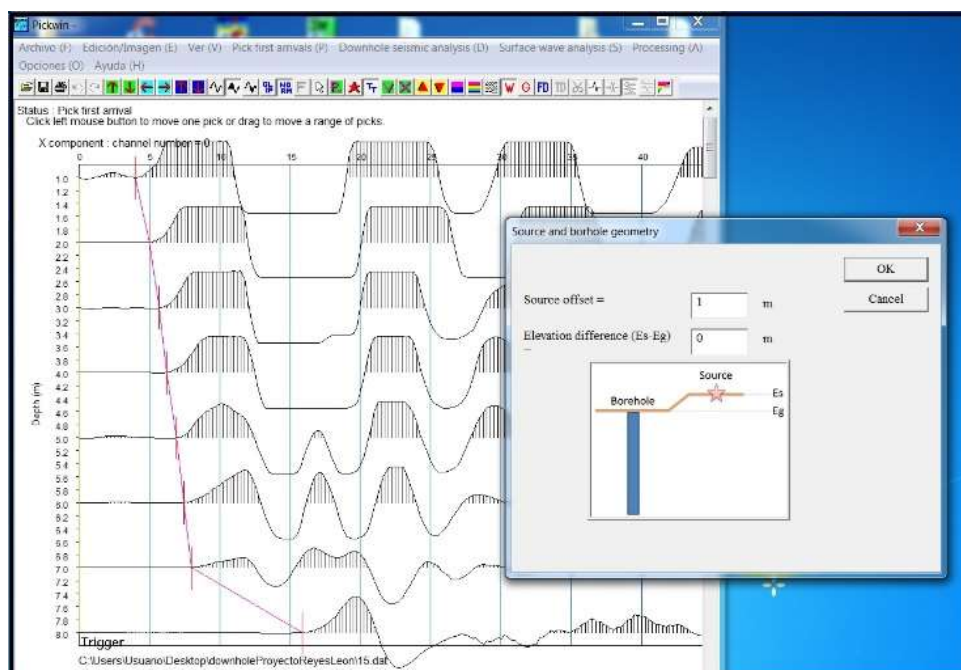


Figura 28. Opción Source offset Distancia platina geófono triaxial (Borehole).

- **Paso 11. Selección del tipo de onda**

Completando correctamente los datos del proyecto siguiendo los pasos anteriormente mencionado se nos abrirá una ventana (*Logging property*) en la cual indicaremos si estamos trabajando con una onda P (*P-wave*) o una onda S (*S-wave*).

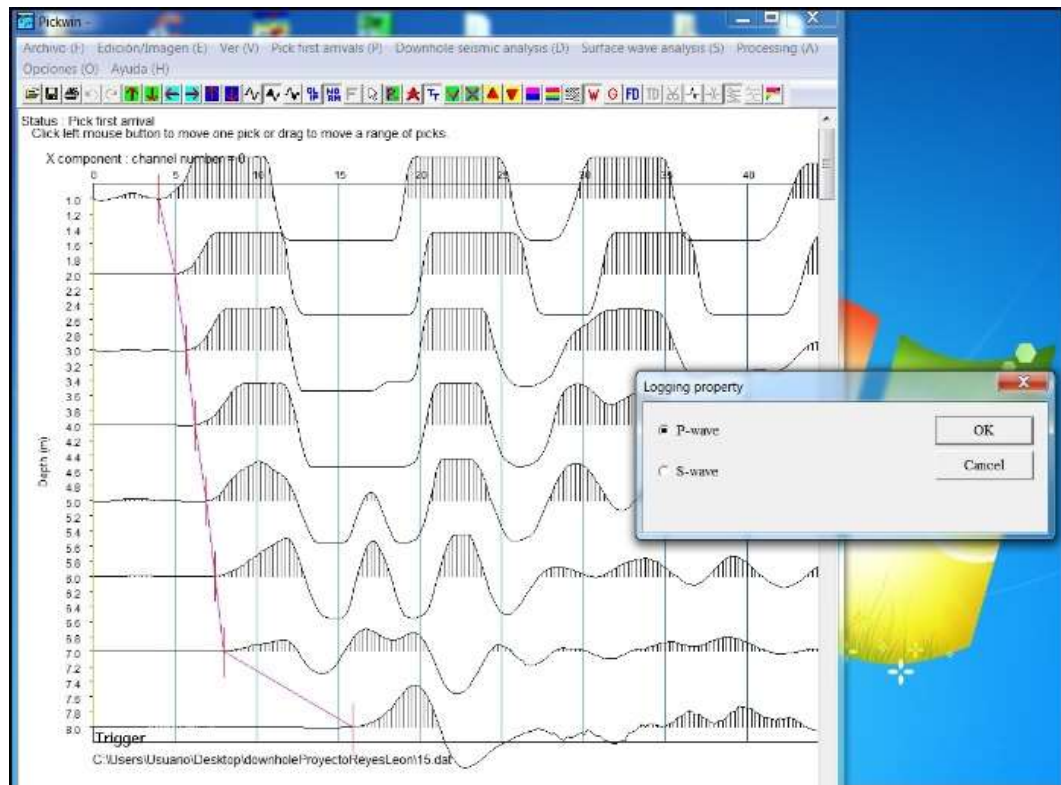


Figura 29. Selección tipo de onda.

- **Paso 12. Visualización curvas camino-tiempo**

Luego se despliega una ventana adicional a la derecha de la ventana de picado de los sismogramas, la cual pertenece a las curvas camino-tiempo y respectivas pendientes según como se allá hecho el picado.

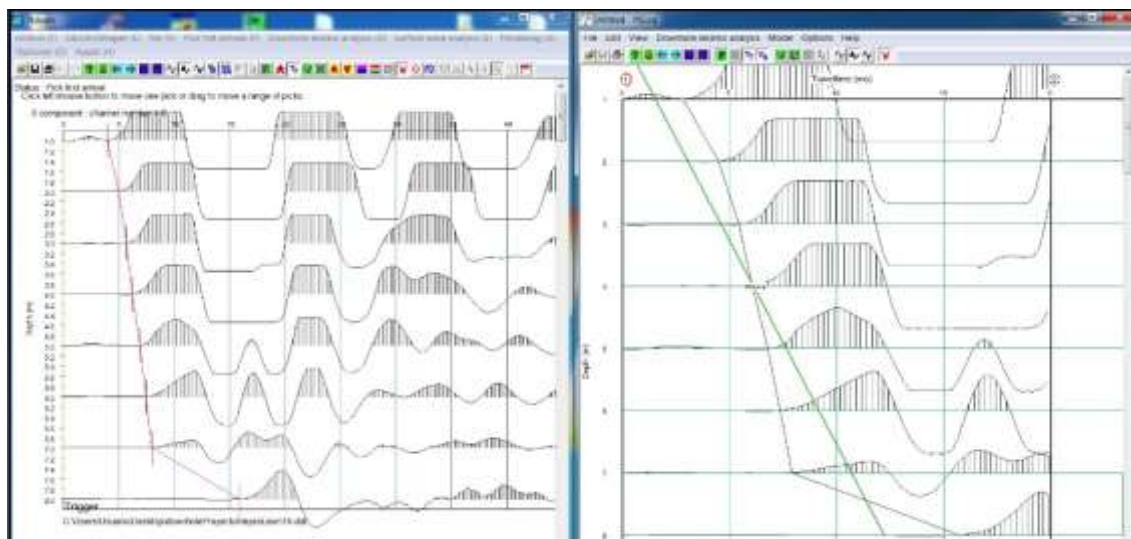


Figura 30. Camino curva camino-tiempo.

- **Paso 13. Generar capas según cambio de suelo**

Para generar capas, según nos muestre el cambio de pendiente, usando el mouse, voy a la opción *Downhole seismic analysis, Insert a new layer boundary (by mouse)*.

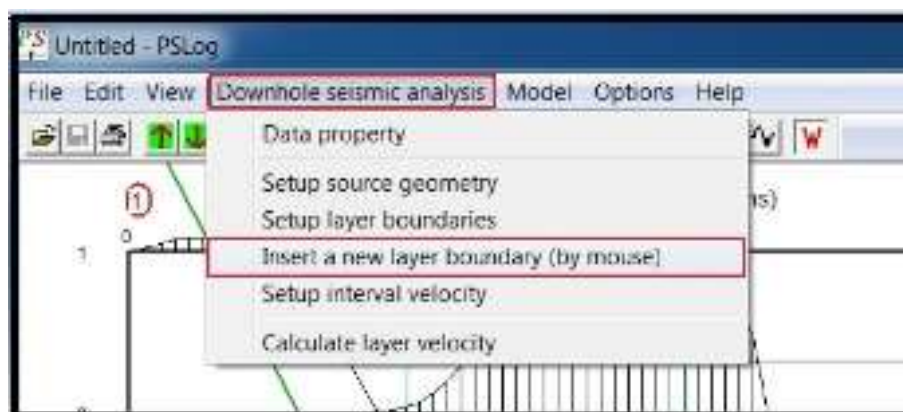


Figura 31. Generar capas por medio del mouse.

- **Paso 14. Obtención de velocidades de onda**

Clickeamos con el mouse en cada cambio de pendiente que deseemos, para el ajuste del modelo 1D que se nos muestre en la pantalla y así obtener las velocidades en cada capa (ver figura 32).

Dado caso que quisiéramos hacer un cambio en el picado damos clic en el icono



Figura 32. Ubicación estrella.

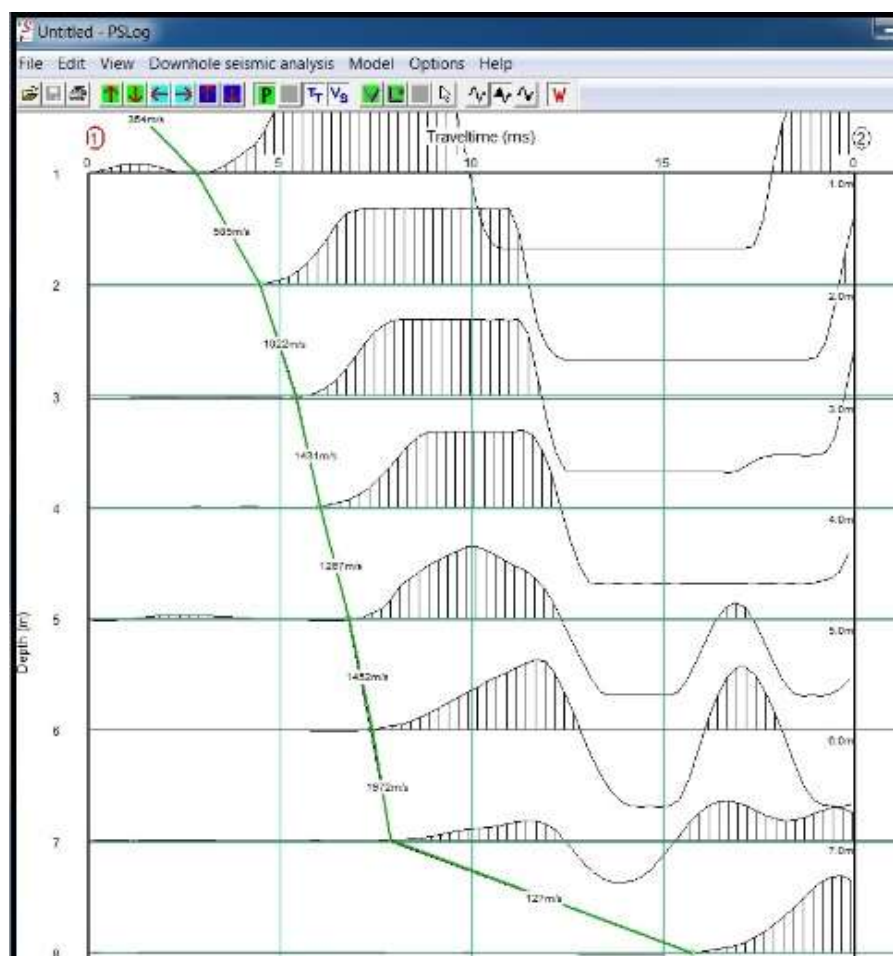
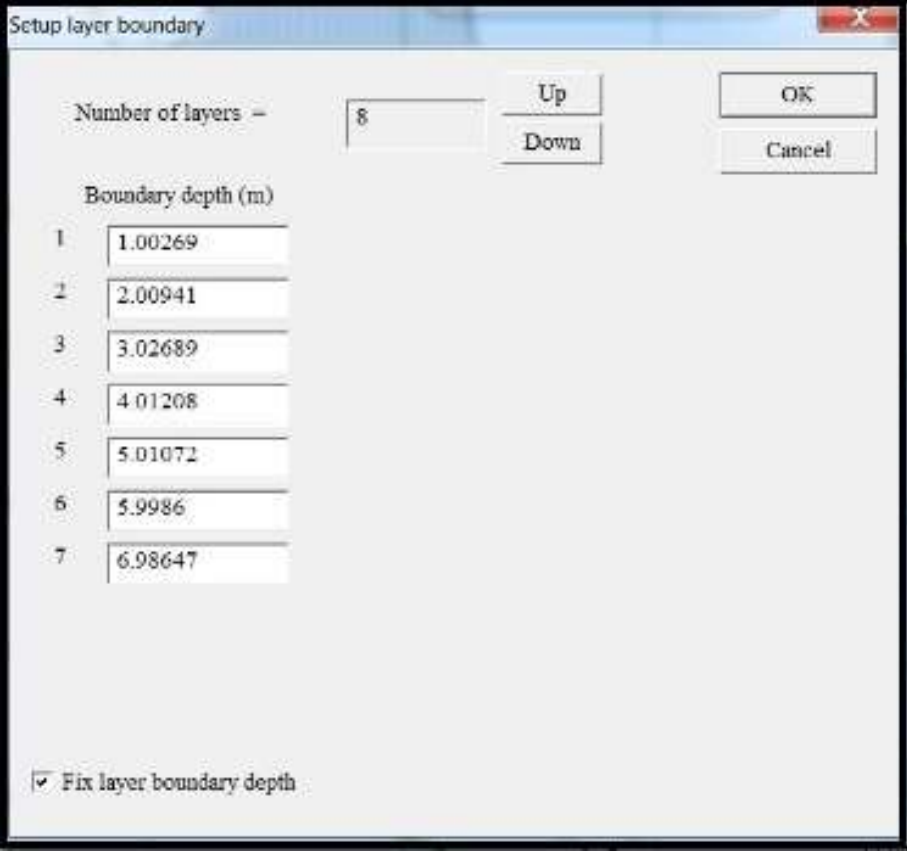


Figura 33. Velocidades de onda.

- **Paso 15. Capas según profundidad**

Si quisiera definir las capas según su profundidad a la que se produce algún cambio importante de pendiente, voy a la opción *Downhole Seismic analysis, Setup layer Boundary*.



Setup layer boundary	
Number of layers -	8
	Up
	Down
	OK
	Cancel
Boundary depth (m)	
1	1.00269
2	2.00941
3	3.02689
4	4.01208
5	5.01072
6	5.9986
7	6.98647
☒ Fix layer boundary depth	

Figura 34. Velocidades según la profundidad.

Mostrando como resultado las velocidades de la onda P:

- 1 metro de profundidad

$$V_p = 349 \left[\frac{m}{s} \right]$$

- 2 metros de profundidad

$$V_p = 550 \left[\frac{m}{s} \right]$$

- 3 metros de profundidad

$$V_p = 865 \left[\frac{m}{s} \right]$$

- 4 metros de profundidad

$$V_p = 1219 \left[\frac{m}{s} \right]$$

- 5 metros de profundidad

$$V_p = 1326 \left[\frac{m}{s} \right]$$

- 6 metros de profundidad

$$V_p = 1664 \left[\frac{m}{s} \right]$$

- 7 metros de profundidad

$$V_p = 1800 \left[\frac{m}{s} \right]$$

- 8 metros de profundidad

$$V_p = 130 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Y ya obtenemos todos los resultados necesarios para la poder sacar los parámetros dinámicos y estratigrafía del suelo.

Para hacer el proceso individual de la onda S, el procedimiento antes descrito es similar, solo que se debe cambiar onda P por ese cómo se explicó en el paso 11.