



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

IMPACTO DEL NIVEL FREÁTICO EN SÍSMICA DE REFRACCIÓN Y MASW

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTOR: RONALDO TAYLOR COCHANCELA TORRES

TUTOR: ING. ALFREDO VLADIMIR VAZQUEZ ROURA, MSC

Cuenca - Ecuador

2025

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Ronaldo Taylor Cochancela Torres con documento de identificación N° 0950922989 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 25 de julio del 2025

Atentamente,



Ronaldo Taylor Cochancela Torres

0950922989

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Ronaldo Taylor Cochancela Torres con documento de identificación N° 0950922989, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del proyecto de investigación: “Impacto del nivel freático en sismica de refracción y MASW”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 25 de julio del 2025

Atentamente,



Ronaldo Taylor Cochancela Torres

0950922989

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alfredo Vladimir Vazquez Roura con documento de identificación N° 0103464103, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “IMPACTO DEL NIVEL FREÁTICO EN SÍSMICA DE REFRACCIÓN Y MASW”, realizado por Ronaldo Taylor Cochancela Torres con documento de identificación N° 0950922989, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de Investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 25 de julio del 2025

Atentamente,



Ing. Alfredo Vladimir Vazquez Roura, MSc

0103464103

DEDICATORIA

A mi padre Clemente.

Por haberme brindado desde pequeño los recursos y oportunidades necesarias para acceder a una buena educación. Por sus sabios consejos, que han marcado mi vida, y por ser el mejor compañero de charlas diarias.

A mi madre Verónica.

Por su dedicación incansable en la formación de mi hermana y yo, por haber estado siempre presente en mi etapa escolar y colegial, velando por mi bienestar y sacrificando tanto de sí misma por nosotros.

A mi hermana Gabriela.

Mi compañera de casa, con quien he compartido gran parte de mi vida. Por los momentos, emociones y experiencias que definen ese lazo único y profundo que solo se resume en el verdadero amor de hermanos.

ÍNDICE

RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	XI
CAPITULO 1	1
FUNDAMENTOS GENERALES DEL PROYECTO.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Descripción del problema	3
1.4 Justificación	4
1.5 Objetivos	5
<i>1.5.1 Objetivo General.....</i>	<i>5</i>
<i>1.5.2 Objetivo Específico</i>	<i>5</i>
1.6 Metodología	6
1.6.1 Técnicas e instrumentos.....	6
1.7 Zona de estudio	7
CAPITULO 2	8
FUNDAMENTO TEÓRICO.....	8
2.1 Comportamiento elástico	8
<i>2.1.1 Concepto de elasticidad en suelos</i>	<i>8</i>
<i>2.1.2 Ley de Hooke generalizada.....</i>	<i>9</i>
<i>2.1.3 Constantes elásticas fundamentales</i>	<i>10</i>
2.2 Propiedades dinámicas del suelo	13
2.2.1 Velocidades de ondas sísmicas (<i>P</i> y <i>S</i>)	13
2.2.2 Relación entre velocidades y propiedades mecánicas.....	15
2.2.3 Coeficiente de Poisson.....	17
2.2.4 Módulo de elasticidad (<i>E</i>) y módulo de rigidez.....	17
2.3 Métodos geofísicos aplicados a la exploración del subsuelo.....	19
2.3.1 Refracción sísmica	19

2.3.2 <i>Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)</i>	26
2.4 Influencia del nivel freático en estudios geofísicos	32
2.4.1 <i>Comportamiento de las ondas en suelos saturados</i>	32
2.4.2 <i>Efecto del agua subterránea en los métodos sísmicos</i>	33
2.5 Clasificación de suelos.....	34
2.5.1 <i>Sistema SUCS: descripción y grupos</i>	34
2.5.2 <i>Ensayos de caracterización</i>	36
2.5.2 <i>Aplicación del SUCS en estudios geofísicos e hidrológicos</i>	38
CAPITULO 3	40
ENSAYOS GEOFÍSICOS.....	40
3.1 Objetivos de los ensayos.....	40
3.1.1 <i>Objetivo General</i>	40
3.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	40
3.2 Ubicación de los ensayos	41
3.2.1 <i>Localización general</i>	41
3.2.2 <i>Zonas de ensayo</i>	41
3.2.3 <i>Mapa general de ubicación</i>	42
3.3 Procedimiento de campo.....	43
3.3.1 <i>Instrumentación utilizada</i>	44
3.3.2 <i>Configuración del tendido</i>	44
3.3.3 <i>Procedimiento de adquisición</i>	45
CAPITULO 4	47
CALICATAS Y RECONOCIMIENTO DIRECTO.....	47
4.1 Procedimiento de campo.....	47
4.2 Descripción técnica de las calicatas	48
4.2.1 <i>Calicata 1</i>	48
4.2.2 <i>Calicata 2</i>	50
4.2.3 <i>Calicata 3</i>	51
4.2.4 <i>Calicata 4</i>	53
4.2.5 <i>Calicata 5</i>	54
4.3 Clasificación SUCS	56

CAPITULO 5	59
PROCESAMIENTO DE VARIABLES FÍSICAS	59
5.1 Datos base obtenidos de los ensayos geofísicos	59
5.2 Análisis de perfiles de velocidad y profundidad	60
5.2.1 <i>Ejemplo de selección de profundidades y velocidades para el análisis de las variables físicas</i>	61
5.3 Cálculo de variables físicas	64
CAPITULO 6	67
ANÁLISIS COMPARATIVO	67
6.1 Comparación entre métodos geofísicos y calicatas	67
6.1.1 <i>Zona 1</i>	67
6.1.2 <i>Zona 2</i>	68
6.1.3 <i>Zona 3</i>	69
6.1.4 <i>Zona 4</i>	70
6.1.5 <i>Zona 5</i>	71
6.2 Influencia del nivel freático en los resultados geofísicos	72
6.3 Validación del uso del coeficiente de Poisson	73
6.4 Propuestas de mejora y recomendaciones técnicas	74
CONCLUSIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	80
ANEXOS.....	82

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de los métodos geofísicos de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) en la determinación de propiedades físicas del suelo en presencia de un nivel freático. El estudio se llevó a cabo en el sector de Challuabamba, ubicado dentro de la parroquia Machángara, en el cantón Cuenca, donde se realizaron cinco ensayos geofísicos acompañados de excavaciones directas (calicatas), con el fin de comparar la información obtenida de ambos métodos.

Como parte del procesamiento, se determinaron las velocidades de propagación de ondas compresionales (V_p) y de corte (V_s) a diferentes profundidades, a partir de las cuales se calcularon parámetros físicos fundamentales como el módulo de elasticidad, módulo de corte, peso específico y coeficiente de Poisson. Para cada zona de estudio se construyeron perfiles sísmicos representativos, se seleccionaron intervalos de análisis según los cambios en la velocidad, y se contrastaron los resultados obtenidos con las observaciones de campo, especialmente en lo que respecta a la profundidad del nivel freático.

El análisis se enfocó en validar la capacidad del coeficiente de Poisson como indicador indirecto de saturación del suelo, identificando rangos característicos y variaciones que podrían asociarse a cambios en el contenido de agua. Además, se discutieron las discrepancias encontradas entre métodos, las posibles limitaciones de cada técnica y los factores que podrían influir en la interpretación de resultados, como el tipo de suelo, profundidad de exploración y condiciones ambientales.

Este trabajo busca contribuir al entendimiento del comportamiento de las ondas sísmicas en suelos saturados, y propone criterios técnicos para mejorar la aplicación e interpretación de métodos geofísicos en estudios hidrogeológicos y de ingeniería civil.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the efficiency of seismic refraction and multichannel analysis of surface waves (MASW) methods in determining the physical properties of soil in the presence of a groundwater table. The study was carried out in the Challuabamba area, located within the Machángara parish of Cuenca canton, where five geophysical surveys were performed in conjunction with direct excavations (test pits), with the aim of comparing the data obtained from both methods.

As part of the processing, the propagation velocities of compressional (V_p) and shear (V_s) waves were determined at different depths. These values were then used to calculate key physical parameters such as elastic modulus, shear modulus, unit weight, and Poisson's ratio. For each test area, representative seismic profiles were constructed, and specific intervals were selected based on velocity changes. The results were compared against field observations, particularly regarding the depth of the groundwater level.

The analysis focused on validating Poisson's ratio as an indirect indicator of soil saturation, identifying characteristic ranges and variations potentially linked to changes in water content. Discrepancies between methods, technical limitations, and factors influencing the interpretation such as soil type, exploration depth, and environmental conditions were also discussed.

This study contributes to a better understanding of seismic wave behavior in saturated soils and proposes technical criteria to enhance the application and interpretation of geophysical methods in hydrogeological and civil engineering projects.

CAPITULO 1 FUNDAMENTOS GENERALES DEL PROYECTO

1.1 Introducción

El uso de métodos geofísicos se ha convertido en una herramienta clave para la exploración del subsuelo en proyectos de ingeniería civil. Entre estos, la sísmica de refracción y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) destacan por su capacidad de ofrecer información valiosa sobre la estructura del terreno de forma no invasiva y eficiente. No obstante, la precisión de estos métodos puede verse comprometida por factores del entorno, como la presencia del nivel freático, el cual modifica las condiciones físicas del suelo y, en consecuencia, afecta la propagación de las ondas sísmicas.

La presencia de agua subterránea puede alterar la interpretación de los resultados obtenidos mediante técnicas geofísicas, generando discrepancias entre los modelos calculados y la realidad del subsuelo. Este efecto ha sido observado en diversos estudios, donde la comparación entre resultados geofísicos y ensayos directos ha puesto en evidencia la influencia del nivel de saturación sobre parámetros como la rigidez del suelo y el coeficiente de Poisson.

En este contexto, surge la necesidad de analizar cómo incide el nivel freático en los resultados de los métodos mencionados y qué tan confiables son bajo estas condiciones. A partir de este análisis, es posible identificar limitaciones, validar resultados y establecer criterios más sólidos para su aplicación en zonas donde la presencia de agua subterránea es significativa.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto del nivel freático sobre la precisión de los métodos de refracción sísmica y MASW, a través de la comparación entre datos obtenidos en campo y resultados de ensayos directos. El estudio se desarrollará en un sitio con presencia conocida de nivel freático, con el fin de observar su influencia en la interpretación de las propiedades dinámicas del suelo.

1.2 Antecedentes

En un estudio realizado en la Universidad Tecnológica de Panamá, se planteó la posibilidad de usar estos métodos geofísicos para detectar niveles freáticos mediante el uso del coeficiente de Poisson. Los resultados indicaron que uno de los métodos presentaba discrepancias, mientras que el otro mostró una mejor correlación con los datos obtenidos mediante sondeos eléctricos. Este hallazgo sugiere que la combinación de métodos sísmicos con la evaluación de parámetros como la relación de Poisson podría mejorar la interpretación de los datos y la detección de niveles freáticos.

En el área de interés, el análisis de refracción sísmica presentó una buena correlación con: el resultado del sondeo eléctrico, el nivel freático y una diferencia aceptable de 30cm con el límite estratigráfico entre ambos limos; sin embargo, el modelo 1D obtenido a través del análisis multicanal de ondas superficiales presentó discrepancias con el resultado del sondeo eléctrico, la lectura del nivel freático y con el límite estratigráfico. (Mojica et al., 2022, pág. 118)

1.3 Descripción del problema

En los estudios de exploración del subsuelo aplicados a la ingeniería civil, los métodos geofísicos han demostrado ser herramientas eficientes y accesibles para obtener información sobre las propiedades físicas del terreno. Sin embargo, su precisión depende en gran medida de las condiciones del entorno en el que se aplican. Uno de los factores que puede generar desviaciones significativas en los resultados es la presencia de un nivel freático no considerado o mal interpretado durante el análisis.

La saturación del suelo modifica la propagación de las ondas sísmicas, especialmente en técnicas como la refracción sísmica y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), lo que puede afectar la identificación correcta de los estratos del subsuelo y alterar parámetros fundamentales como las velocidades de onda, la rigidez del suelo o el coeficiente de Poisson. Esta situación puede conducir a modelos geofísicos inconsistentes con la realidad del terreno, dificultando su validación con métodos directos y comprometiendo la toma de decisiones técnicas en proyectos de cimentación, estabilización de taludes o diseño estructural.

En la práctica, esto implica que un mismo terreno puede presentar resultados distintos dependiendo de la profundidad del nivel freático al momento del estudio, lo que genera incertidumbre sobre la confiabilidad de los métodos aplicados. Además, no existe un procedimiento técnico formalmente establecido que indique cómo interpretar o ajustar los resultados de estos métodos bajo condiciones de saturación, lo que limita su uso efectivo en zonas con variaciones hidrológicas importantes.

Por tanto, el problema central radica en determinar en qué medida la presencia del nivel freático afecta la interpretación de los resultados obtenidos mediante refracción sísmica y MASW, y si es posible establecer un criterio que permita corregir o mejorar su precisión en este tipo de condiciones.

1.4 Justificación

La exploración geofísica del subsuelo es una etapa clave en la ingeniería civil, ya que permite obtener información sobre la rigidez, la estratigrafía y otras propiedades fundamentales del terreno. Métodos como la sísmica de refracción y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) son ampliamente utilizados por su rapidez, bajo costo y carácter no invasivo. Sin embargo, su correcta interpretación puede verse afectada por factores naturales, entre ellos la presencia de un nivel freático, lo cual representa una fuente potencial de error en los estudios de suelo si no es adecuadamente considerada.

La saturación del terreno modifica el comportamiento mecánico del suelo, afecta la velocidad de propagación de las ondas sísmicas y puede alterar parámetros derivados como el coeficiente de Poisson o el módulo de rigidez. Si estos efectos no se detectan ni se corrigen adecuadamente, existe el riesgo de que los modelos obtenidos representen de forma inexacta la realidad del terreno. Esta situación podría derivar en errores de diseño, sobredimensionamientos, fallas en la cimentación o inestabilidad en obras de ingeniería.

Actualmente, no existe una metodología técnica claramente establecida que oriente sobre cómo ajustar los resultados geofísicos ante la presencia de agua subterránea. Esto deja un vacío

que puede limitar el uso eficiente y confiable de estas técnicas en zonas donde el nivel freático es variable o significativo. En este sentido, la presente investigación cobra relevancia, ya que busca evaluar la precisión de los métodos geofísicos mencionados cuando se aplican en condiciones reales de saturación, contrastando sus resultados con datos obtenidos mediante exploración directa.

Este trabajo permitirá generar criterios técnicos para interpretar con mayor confiabilidad los estudios geofísicos en presencia de nivel freático, así como proponer recomendaciones aplicables a futuros proyectos. El aporte de esta tesis puede contribuir a mejorar la toma de decisiones en etapas de diseño y construcción, optimizando los recursos y elevando el nivel de seguridad en obras civiles.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Evaluar la eficiencia de los métodos de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) para obtener la información correcta sobre las propiedades geofísicas del suelo estudiado al considerar la existencia de un nivel freático.

1.5.2 Objetivo Específico

- Identificar los factores que afectan la interpretación de los resultados de estos métodos geofísicos.
- Proponer mejoras, alternativas o recomendaciones para la aplicación de estos métodos geofísicos para estudios hidrogeológicos y proyectos de ingeniería civil en los que exista un nivel freático.

1.6 Metodología

La presente investigación adopta un enfoque metodológico mixto que combina herramientas teóricas y empíricas, con el objetivo de evaluar la influencia del nivel freático sobre los resultados obtenidos mediante los métodos geofísicos de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW). La metodología contempla el desarrollo de actividades en campo, análisis comparativo de resultados y procesamiento de datos mediante fórmulas físicas y herramientas computacionales.

1.6.1 Técnicas e instrumentos

- **Métodos geofísicos:** Se realizarán ensayos de refracción sísmica y MASW en puntos específicos de un terreno de estudio donde se conoce la presencia de nivel freático. Se utilizarán geófonos, estimulantes sísmicos, cables y sistemas de adquisición de datos para registrar las ondas sísmicas.
- **Exploración directa:** Se ejecutarán sondeos mecánicos para validar los resultados obtenidos mediante métodos indirectos, midiendo de forma directa la profundidad del nivel freático y el tipo de suelo.
- **Instrumentación auxiliar:** Para los sondeos se utilizarán equipos como retroexcavadora y herramientas de medición manual.

1.7 Zona de estudio

La investigación se desarrolló en un terreno en cantón Cuenca, provincia del Azuay. Este sector forma parte del área de expansión urbana al noreste de la ciudad, caracterizándose por contar con amplias zonas verdes, baja densidad de edificaciones y acceso relativamente fácil para equipos de campo. Su creciente urbanización lo convierte en un punto de interés para estudios de caracterización geotécnica y evaluación del subsuelo.

El área seleccionada presenta una superficie abierta, cubierta por vegetación natural baja, con suelos blandos a intermedios que permiten la ejecución de estudios mediante maquinaria ligera, como retroexcavadoras. La topografía es predominantemente plana, lo que facilita la instalación de equipos geofísicos y la ejecución de ensayos sin interferencias por inclinaciones o escurrimientos superficiales.

Desde un punto de vista visual y preliminar, el terreno muestra una capa superficial orgánica delgada, seguida por suelos de tonalidades oscuras con inclusión de fragmentos pétreos dispersos, lo cual sugiere materiales de origen coluvial o aluvial, típicos de zonas de transición geológica. Estas condiciones resultan relevantes para este estudio, ya que permiten analizar el comportamiento de los métodos sísmicos ante variaciones naturales del terreno y la posible presencia de un nivel freático a poca profundidad.

Además, el entorno inmediato se encuentra libre de interferencias antrópicas significativas (como instalaciones eléctricas, estructuras o tráfico), lo que asegura un ambiente adecuado para la aplicación de métodos geofísicos como la sísmica de refracción y el MASW.

CAPITULO 2 FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Comportamiento elástico

En el contexto de la ingeniería geotécnica y la exploración geofísica, el comportamiento elástico del suelo se refiere a la capacidad del material para deformarse bajo la acción de un esfuerzo y recuperar su forma original una vez que cesa la carga, siempre que esta deformación se mantenga dentro del rango de elasticidad. Este tipo de comportamiento es fundamental para interpretar los resultados de métodos como la refracción sísmica y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), los cuales se basan en la propagación de ondas a través de medios elásticos.

2.1.1 *Concepto de elasticidad en suelos*

Cuando un cuerpo es sometido a fuerzas externas, este experimenta una deformación. Al retirarse dichas fuerzas, el cuerpo tiende a recuperar su forma original, lo que se conoce como elasticidad. Esta propiedad está presente en mayor o menor medida en todos los materiales.

No obstante, en la práctica, ningún cuerpo es completamente elástico ni completamente inelástico. Las deformaciones que se producen suelen estar compuestas por una parte reversible (elástica) y otra permanente. En muchos casos, si las cargas aplicadas no superan ciertos niveles, la deformación permanente es tan pequeña que el material puede considerarse, de forma aproximada, como elástico. (Cervera y Blanco, 2001)

2.1.2 Ley de Hooke generalizada

Cuando un cuerpo es sometido a fuerzas externas, este experimenta una deformación. Al retirarse dichas fuerzas, el cuerpo tiende a recuperar su forma original, lo que se conoce como elasticidad. Esta propiedad está presente en mayor o menor medida en todos los materiales.

No obstante, en la práctica, ningún cuerpo es completamente elástico ni completamente inelástico. Las deformaciones que se producen suelen estar compuestas por una parte reversible (elástica) y otra permanente. En muchos casos, si las cargas aplicadas no superan ciertos niveles, la deformación permanente es tan pequeña que el material puede considerarse, de forma aproximada, como elástico. (Cervera & Blanco, 2001) Esta relación se expresa comúnmente como:

Ecuación 1

Fórmula general de la Ley de Hooke

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Donde:

- σ es el esfuerzo normal,
- E es el módulo de elasticidad del material
- ε es la deformación unitaria

Para materiales tridimensionales, como los suelos considerados en estudios dinámicos, esta relación se extiende a su forma generalizada, en la que los esfuerzos y deformaciones en las tres direcciones principales están interrelacionados. En un medio elástico, lineal e isotrópico, la Ley de Hooke generalizada permite vincular el estado de esfuerzos con el estado de deformaciones mediante dos constantes elásticas independientes, típicamente el módulo de elasticidad E y el coeficiente de Poisson ν .

2.1.3 Constantes elásticas fundamentales

Existen seis constantes elásticas que se utilizan con frecuencia para describir el comportamiento de los materiales: E , ν , K , G , λ y μ .

El conocimiento de cualquiera de dos de estas constantes es suficiente para determinar completamente el comportamiento elástico del material, ya que cada una de ellas puede expresarse en función de cualquier otro par de las mencionadas. (Figuroa & Bravo, 2014)

En la Figura 1, se puede apreciar las relaciones que pueden tener cada una de estas:

Figura 1

Relaciones entre Constantes Elásticas

	E : módulo de Young ν : coeficiente de Poisson	K : módulo de compresibilidad G : módulo de rigidez	λ : 1º coeficiente de Lamé μ : 2º coeficiente de Lamé
(E, ν)	-----	$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$	$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$
(K, G)	$E = \frac{9KG}{3K+G}$ $\nu = \frac{3K-2G}{2(3K+G)}$	-----	$\lambda = K - \frac{2G}{3}$ $\mu = G$
(λ, μ)	$E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}$ $\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$K = \lambda + \frac{2\mu}{3}$ $G = \mu$	-----

Nota. Reproducida de Relaciones Entre Constantes Elásticas (Material Isótropo Lineal), de Figuroa & Bravo, 2014.

2.1.3.1 Módulo de Elasticidad (E)

Según la ley de Hooke, cuando un cuerpo se somete a tensión de tracción o compresión, la tensión aplicada es directamente proporcional a la deformación dentro de los límites elásticos de dicho cuerpo. La relación entre la tensión aplicada y la deformación es constante y se conoce como módulo de Young o módulo de elasticidad. El módulo de Young se denota con la letra "E". (Universidad de Sonora, s. f.)

Ecuación 2

Módulo de Elasticidad

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde:

- σ es la tensión uniaxial.
- ε es la deformación.

2.1.3.2 Módulo de Compresibilidad (K)

Cuando un cuerpo se somete a tensiones directas perpendiculares entre sí, iguales e iguales, dentro de sus límites elásticos, la relación entre la tensión directa y la deformación volumétrica correspondiente se mantiene constante. Esta relación se denomina módulo de compresibilidad y se representa con la letra "K".(Universidad de Sonora, s. f.)

Ecuación 3*Módulo de Compresibilidad*

$$K = -\frac{p}{\Delta V/V}$$

Donde:

- p es la presión.
- $\Delta V/V$ representa el cambio volumétrico.

2.1.3.3 Módulo de Corte (G)

Cuando un cuerpo se somete a un esfuerzo cortante, su forma cambia. La relación entre el esfuerzo cortante y la deformación cortante correspondiente se denomina módulo de rigidez. Se representa con las letras "G", "C" o "N".(Universidad de Sonora, s. f.)

Ecuación 4*Módulo de Corte*

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

Donde:

- τ es el esfuerzo cortante.
- γ es la deformación angular.

2.1.3.4 Coeficiente de Poisson (ν)

Cuando un cuerpo se somete a una tensión de tracción simple dentro de sus límites elásticos, se produce un cambio en sus dimensiones, tanto en la dirección de la carga como en la dirección opuesta. Al dividir estas dimensiones modificadas por sus dimensiones originales, se

obtienen la deformación longitudinal y la deformación lateral. La relación entre la deformación lateral y la deformación longitudinal se denomina coeficiente de Poisson y se representa con el símbolo " μ ". (Universidad de Sonora, s. f.).

Ecuación 5

Coefficiente de Poisson

$$\nu = \frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}}$$

Donde:

- $\varepsilon_{transversal}$ es la deformación transversal.
- $\varepsilon_{longitudinal}$ es la deformación longitudinal.

2.2 Propiedades dinámicas del suelo

2.2.1 Velocidades de ondas sísmicas (P y S)

En medios elásticos como los suelos, la propagación de perturbaciones sísmicas genera diferentes tipos de ondas. Las más relevantes para la caracterización dinámica del subsuelo son las ondas primarias (P) y las ondas secundarias (S), también conocidas como ondas de compresión y ondas de corte, respectivamente.

2.2.1.1 Ondas Primarias

La onda P (primaria) es una onda longitudinal, en la que las partículas del medio vibran en la misma dirección de propagación de la onda. Es la primera en llegar a los sensores porque tiene la mayor velocidad de propagación. Su velocidad V_p depende de la rigidez volumétrica del medio (módulo de compresibilidad) y de su densidad. (Vazquez, 2017)

Ecuación 6

Velocidad de Ondas P

$$Vp = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

Donde:

- K es el módulo de compresibilidad.
- G es el módulo de rigidez.
- ρ es la densidad del medio.

2.2.1.2 Ondas Secundarias

La onda S (secundaria) es una onda transversal, donde las partículas se mueven en dirección perpendicular al avance de la onda. Es más lenta que la onda P, pero aporta información más directa sobre la rigidez al corte del suelo. Su velocidad Vs depende únicamente del módulo de rigidez (G) y la densidad (ρ). (Vazquez, 2017)

Ecuación 7

Velocidad de Ondas S

$$Vs = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Donde:

- G es el módulo de rigidez.
- ρ es la densidad del medio.

2.2.2 *Relación entre velocidades y propiedades mecánicas*

Las velocidades de propagación de las ondas sísmicas V_p y V_s no solo permiten caracterizar el comportamiento dinámico del suelo, sino que también se utilizan para calcular parámetros elásticos fundamentales como el módulo de rigidez (G), el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν), bajo el supuesto de que el suelo se comporta como un medio elástico, lineal e isotrópico.

La velocidad de la onda S está directamente relacionada con el módulo de rigidez, mediante la expresión:

Ecuación 8

Relación entre Velocidad de Onda S y el Módulo de Rigidez G

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

Donde:

- G es el módulo de rigidez.
- ρ es la densidad del medio.
- V_s es la velocidad de la onda S.

Una vez conocido el valor de G , se puede estimar el módulo de elasticidad (E) si se conoce el coeficiente de Poisson (ν), a través de la relación:

Ecuación 9

Relación entre el Módulo de Rigidez y el Coeficiente de Poisson con el Módulo de Elasticidad

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Donde:

- E es el módulo de elasticidad.
- G es el módulo de rigidez.
- ν es el coeficiente de Poisson.

Por otro lado, al contar con ambas velocidades V_p y V_s , se puede calcular directamente el coeficiente de Poisson con la siguiente fórmula:

Ecuación 10

Relación entre Velocidad de Onda V_p y V_s con el Coeficiente de Poisson

$$\nu = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{V_p^2 - 2V_s^2}$$

Donde:

- ν es el coeficiente de Poisson.
- V_p es la velocidad de onda P.
- V_s es la velocidad de onda S.

Estas expresiones permiten vincular directamente los resultados de los ensayos geofísicos con las propiedades mecánicas del suelo, lo cual es especialmente útil en estudios donde no se dispone de ensayos destructivos o de laboratorio. Además, la relación entre velocidades y módulos

permite evaluar indirectamente el estado de saturación del terreno, ya que su influencia se refleja en los cambios en V_p , V_s y, por tanto, en las constantes elásticas calculadas. (Engineers 0, 2025)

2.2.3 *Coefficiente de Poisson*

En materiales elásticos e isotrópicos, ν es un valor adimensional que usualmente se encuentra en un rango entre 0 y 0.5. Un valor de $\nu=0.5$ corresponde al caso ideal de un material incompresible, donde no existe cambio de volumen bajo carga (por ejemplo, el agua). Por otro lado, valores menores indican mayor compresibilidad. En suelos, el coeficiente de Poisson es sensible al tipo de material y a su estado de saturación:

Tabla 1

Rango Típico del Coeficiente de Poisson según el Tipo de Suelo

Tipo de suelo	Rango típico de ν	Observación
Arena seca o suelta	0.20 – 0.30	Mayor compresibilidad
Arena compacta	0.30 – 0.40	Menor deformación lateral
Arcilla saturada	0.45 – 0.49	Alta deformación lateral, casi incompresible
Suelo altamente saturado	≈ 0.50	Comportamiento casi incompresible

2.2.4 *Módulo de elasticidad (E) y módulo de rigidez*

En el marco de esta investigación, el módulo de elasticidad (E) y el módulo de rigidez (G) no solo representan parámetros mecánicos fundamentales, sino que actúan como indicadores indirectos del comportamiento dinámico del suelo y su respuesta frente a la saturación.

Ambos módulos son afectados por la densidad del suelo y la velocidad de propagación de las ondas, parámetros que se modifican en presencia de agua subterránea. Por ejemplo, suelos saturados suelen mostrar una reducción de V_s y un aumento relativo de ν , lo cual incide directamente en el valor de E . En condiciones saturadas, el módulo G puede disminuir, indicando una pérdida de rigidez estructural. Una interpretación adecuada de estos módulos permite:

- Identificar zonas potencialmente saturadas mediante valores bajos de G y altos de ν .
- Estimar la rigidez relativa de los estratos analizados sin necesidad de ensayos destructivos.
- Validar la confiabilidad de los métodos geofísicos al compararlos con resultados de exploración directa.

Así, en lugar de limitarse a representar propiedades elásticas ideales, E y G se utilizan en esta investigación como herramientas de análisis comparativo y de interpretación hidrogeológica, especialmente al evaluar la influencia del nivel freático en los perfiles de velocidad obtenidos en campo.

2.3 Métodos geofísicos aplicados a la exploración del subsuelo

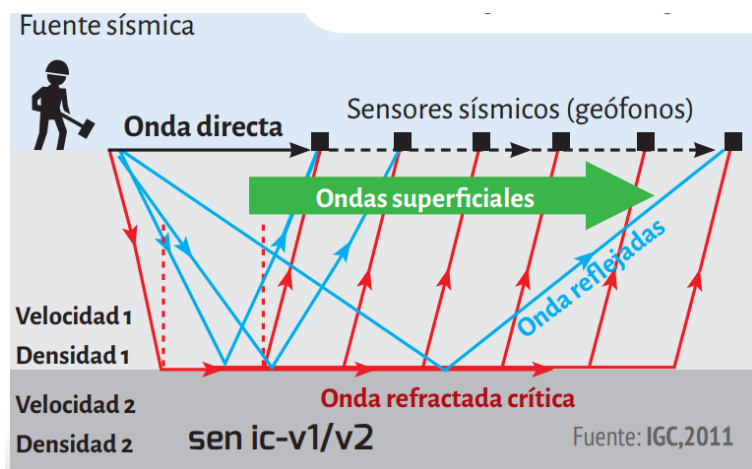
2.3.1 Refracción sísmica

2.3.1.1 Concepto y fundamentos físicos

La refracción sísmica es un método geofísico de exploración indirecta que permite estudiar la estratigrafía del subsuelo a partir de la propagación de ondas sísmicas. El principio en el que se basa es la refracción, que ocurre cuando una onda atraviesa la frontera entre dos medios con distintas propiedades físicas, cambiando su dirección de propagación.

Esta variación se rige por la ley de Snell, la cual establece que cuando una onda pasa de un medio menos rígido a uno más rígido (mayor velocidad sísmica), parte de la energía se refracta a lo largo del límite entre capas, mientras otra parte sigue su camino hacia la superficie.

Las ondas que se utilizan en este método son principalmente las ondas P (primarias o de compresión), ya que son las que viajan más rápido por el subsuelo. La velocidad de estas ondas (V_p) depende directamente de la rigidez del material y su densidad, por lo que el análisis de sus velocidades permite inferir propiedades físicas como la compactación, saturación o el tipo de suelo presente. (EVEREST GEOPHYSICS, 2022b)

Figura 2*Refracción Sísmica*

Nota. Reproducida de Esquema de la refracción sísmica y la llegada de las ondas a los geófonos, de Rivera, Piedra & Paripanca, 2015

(<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/18630/18868>)

En suelos con mayor saturación, por ejemplo, la velocidad de las ondas P tiende a incrementarse, debido a que el agua transmite mejor las ondas de compresión que el aire.

2.3.1.2 Objetivo del método en estudios geotécnicos

En el ámbito geotécnico, el principal objetivo de la refracción sísmica es determinar la distribución de velocidades sísmicas del subsuelo, lo que permite inferir la estratigrafía, el espesor de las capas y su grado de compactación o rigidez. Al analizar cómo varía la velocidad de propagación de las ondas P en profundidad, se pueden identificar cambios en el tipo de suelo, presencia de estratos más consolidados y zonas de posible saturación. Esto resulta útil para:

- Caracterizar mecánicamente el suelo, sin necesidad de excavaciones.
- Delimitar capas con diferente resistencia, especialmente en la zona superficial.

- Localizar zonas saturadas, ya que la presencia de agua afecta la velocidad de las ondas.
- Apoyar el diseño de cimentaciones, cortes, rellenos u otras obras civiles.

En esta investigación, la refracción sísmica se emplea para obtener perfiles de velocidad V_p en distintos puntos del terreno, con el propósito de evaluar la posible influencia del nivel freático y comparar los resultados obtenidos con los datos de calicatas y del método MASW. Así, este método constituye una herramienta clave en la caracterización dinámica del suelo y en el análisis hidrogeológico complementario.

2.3.1.3 Procedimiento de campo

1. **Instalación del sistema de adquisición:** Se dispone una línea recta de geófonos verticales, conectados a través de un cable de refracción a un sismógrafo multicanal, que actúa como unidad de adquisición. El sistema es alimentado por una batería portátil de campo. El número de geófonos y el espaciamiento entre ellos dependen de la profundidad de investigación deseada.
2. **Generación de la fuente sísmica:** La energía se genera mediante un martillo metálico que golpea una placa de acero colocada en el terreno. Este impacto genera ondas sísmicas que se propagan por el subsuelo, atravesando los diferentes estratos.
3. **Registro de los tiempos de llegada:** Las ondas son detectadas por los geófonos, y el sismógrafo registra los tiempos de arribo con alta precisión. Estos registros se almacenan digitalmente para su posterior análisis.

4. **Configuración de disparos múltiples:** Para mejorar la calidad de los datos, se realizan disparos en distintas posiciones a lo largo de la línea (en los extremos y en el centro), lo cual permite cubrir diferentes trayectorias y obtener una mejor resolución en profundidad.
5. **Consideraciones del terreno:** Durante el levantamiento, se toman en cuenta factores como la topografía local, la compactación del suelo, la humedad superficial y las posibles interferencias ambientales, ya que estos pueden influir en la calidad de los registros. (GEORYS INGENIEROS S.A.C., 2016)

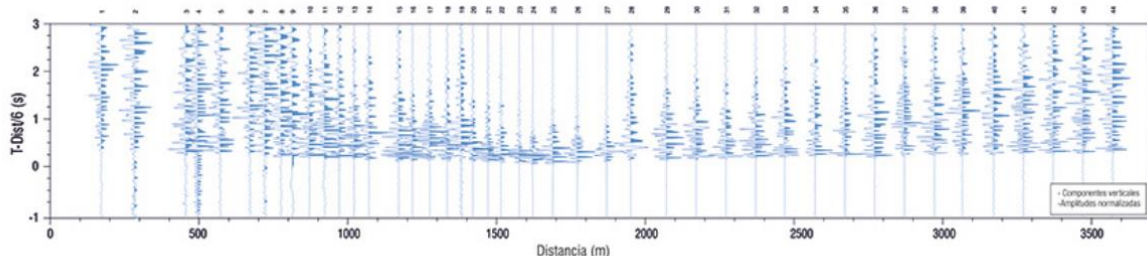
2.3.1.4 Procesamiento e interpretación de datos

El procesamiento de datos en el método de refracción sísmica tiene como finalidad transformar los registros obtenidos en campo en perfiles de velocidad del subsuelo, los cuales permiten interpretar la estructura estratigráfica y sus propiedades mecánicas.

Una vez registrados los tiempos de llegada de las ondas sísmicas a cada geófono, se elabora una curva de tiempo vs. Distancia (Figura 3), donde se representa el tiempo de arribo en función de la posición de cada sensor. Estas curvas permiten identificar cambios en la pendiente que indican la presencia de fronteras entre capas con distintas velocidades.

Figura 3

Tiempo vs Distancia

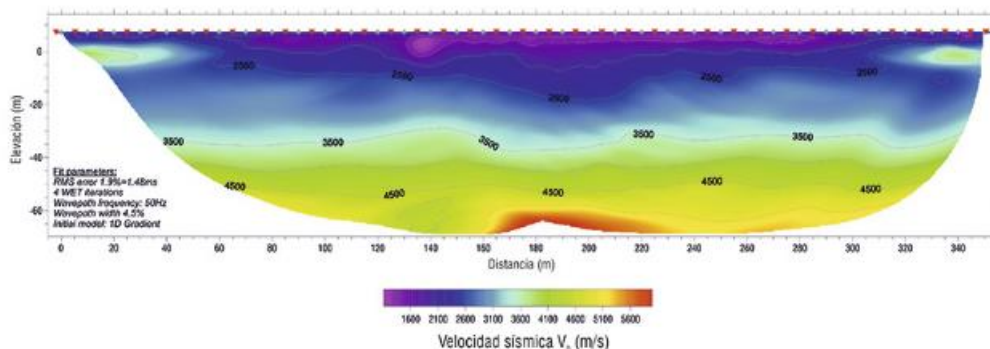


Nota. Reproducida de datos sísmicos de refracción profunda con fuente explosiva, de Everest Geophysics, 2022 (<https://everestgeophysics.com/es/metodos/sismicos/refraccion/>)

Con base en estos datos, se calculan:

- Las velocidades sísmicas aparentes, correspondientes a cada segmento recto de la curva.
- Los ángulos de refracción, aplicando la ley de Snell.
- Las profundidades aproximadas de los estratos, mediante relaciones geométricas entre el tiempo de arribo y la distancia.

El procesamiento puede realizarse de manera manual, semiautomática o con el uso de software especializado (como SeisImager, Geogiga o WinSism), que permiten generar modelos 1D o 2D del subsuelo. Estos modelos muestran cómo varía la velocidad V_p con la profundidad, lo que puede relacionarse con el tipo de material, su grado de compactación y su contenido de humedad.

Figura 4*Velocidad sísmica V_p vs Elevación*

Nota. Reproducida de Modelo de velocidad de ondas P, de Everest Geophysics, 2022 (<https://everestgeophysics.com/es/metodos/sismicos/refraccion/>)

La interpretación se basa en la comparación de las velocidades obtenidas con rangos típicos conocidos para distintos tipos de suelos. Por ejemplo, valores bajos de V_p suelen asociarse a materiales sueltos o secos, mientras que velocidades más altas pueden indicar suelos compactos o saturados. De este modo, la refracción sísmica permite inferir indirectamente la presencia de nivel freático y realizar una caracterización dinámica preliminar del terreno.

2.3.1.5 Ventajas y limitaciones

2.3.1.5.1 Ventajas

- **Prospección somera eficaz:** permite detectar estratos a muy poca profundidad, lo cual es difícil de lograr con otros métodos como la reflexión sísmica.
- **Rapidez y simplicidad operativa:** tanto la adquisición como el procesamiento e interpretación de datos pueden realizarse de forma relativamente ágil y con un equipo de trabajo reducido.

- **Eficiencia en grandes áreas:** abarca extensiones amplias en tiempos cortos, siendo útil para generar un diagnóstico preliminar del terreno.
- **Bajo costo relativo:** en comparación con métodos más complejos o destructivos, su implementación resulta económica para el proyectista. (GEORYS INGENIEROS S.A.C., 2016)

2.3.1.5.2 Limitaciones

- **Sensibilidad al ruido ambiental:** no es recomendable en zonas urbanas o con alta actividad vibratoria, ya que las interferencias dificultan la detección precisa de las señales.
- **Incapacidad para detectar capas de baja velocidad:** cuando una capa subyacente tiene menor velocidad que la superior, no se genera refracción crítica, por lo que esa capa no es reconocida en el modelo.
- **Modelos simples y poco detallados:** las soluciones suelen basarse en modelos estratificados horizontales, lo que impide representar correctamente geometrías complejas, buzamientos fuertes o gradientes laterales pronunciados.
- **Ausencia de estimaciones confiables de incertidumbre:** los modelos obtenidos no siempre reflejan el grado de precisión o ambigüedad de los resultados. (P, 2019)

2.3.2 *Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)*

2.3.2.1 Concepto y fundamentos físicos

El Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) es un método geofísico no destructivo que permite obtener el perfil de rigidez del subsuelo a partir de la propagación de ondas superficiales, en particular las ondas Rayleigh, que son un tipo de onda S que viaja por la superficie terrestre. A diferencia de la refracción sísmica, que analiza las ondas P (compresionales), el MASW se basa en el análisis de la velocidad de dispersión de las ondas superficiales, ya que estas ondas cambian de velocidad según la frecuencia y la rigidez del material por el que viajan. Este comportamiento dispersivo permite estimar cómo varía la velocidad de onda de corte (V_s) con la profundidad. (EVEREST GEOPHYSICS, 2022)

El fundamento físico se apoya en el hecho de que las ondas Rayleigh viajan en forma de paquetes de energía (trenes de ondas) que afectan principalmente los primeros metros del suelo. Las frecuencias bajas penetran más profundo, mientras que las altas se concentran cerca de la superficie. Por tanto, analizando las diferentes frecuencias contenidas en una señal, es posible construir un perfil 1D de V_s con profundidad. Para ello, el método utiliza un conjunto de geófonos dispuestos en línea y un sismógrafo multicanal para registrar los movimientos generados por una fuente de energía superficial (como un golpe de martillo). Luego, mediante técnicas de procesamiento espectral, se genera una curva de dispersión que relaciona la velocidad aparente de la onda con su frecuencia, a partir de la cual se obtiene el perfil de rigidez del subsuelo. Este perfil es altamente útil en ingeniería civil, ya que la velocidad de onda S está directamente relacionada con parámetros dinámicos como el módulo de rigidez (G) y permite clasificar los suelos según su comportamiento sísmico, sin necesidad de perforaciones ni ensayos destructivos

2.3.2.2 Objetivo del método en estudios geotécnicos

El método MASW tiene como principal objetivo en geotecnia la obtención del perfil de velocidades de onda de corte (V_s) del subsuelo, lo cual permite evaluar la rigidez de los distintos estratos con profundidad. Esta información es de gran valor en estudios dinámicos del terreno, ya que V_s está directamente relacionada con el módulo de rigidez (G), una de las constantes elásticas fundamentales del suelo. A través del análisis de la dispersión de las ondas superficiales, el MASW permite:

- Caracterizar dinámicamente los materiales del subsuelo mediante la variación de V_s con la profundidad.
- Detectar cambios de litología o compactación, que afectan la propagación de las ondas.
- Clasificar el suelo según normas sísmicas, como el V_{s30} , que es la velocidad promedio en los primeros 30 metros, clave para determinar el tipo de suelo en códigos de diseño estructural.
- Estimar indirectamente el estado de saturación o la densidad relativa, en conjunto con otros parámetros.
- Complementar otros métodos geofísicos como la refracción sísmica, proporcionando una visión más completa del comportamiento del terreno.

En el contexto geotécnico, el MASW destaca por su capacidad para detectar zonas blandas o de baja rigidez, incluso cuando están cubiertas por capas más rígidas, lo que representa una ventaja frente a métodos basados en ondas P. Por esta razón, su uso se ha extendido en la evaluación de sitios para cimentaciones, estudios sísmicos y análisis de estabilidad de suelos.

2.3.2.3 Procedimiento de campo

1. **Disposición del arreglo:** Se instala una línea recta de geófonos conectados al sismógrafo, con espaciamiento regular entre sensores (típicamente entre 1 y 5 metros). El número de geófonos puede variar entre 12 y 24 canales, en función de la profundidad de estudio requerida.
2. **Generación de la señal sísmica:** Se aplica una fuente de impacto (usualmente un golpe con martillo sobre una placa metálica), colocada a cierta distancia del primer geófono. La distancia de la fuente respecto al arreglo (offset) y la ubicación de múltiples disparos son fundamentales para mejorar la resolución y la calidad del espectro.
3. **Adquisición de datos:** El sismógrafo registra las señales generadas por la onda Rayleigh en todos los canales simultáneamente. Estas señales incluyen una gama de frecuencias que penetran a diferentes profundidades, lo que permite construir un perfil dispersivo del terreno.
4. **Condiciones del sitio y repetición de disparos:** Se consideran las condiciones superficiales del terreno, la topografía, y se asegura el buen contacto de los geófonos con el suelo. Se realizan múltiples disparos desde diferentes posiciones para mejorar la resolución y confiabilidad de los resultados.
5. **Almacenamiento de datos:** Todas las señales registradas se almacenan digitalmente para su posterior análisis espectral en gabinete. (GEORYS INGENIEROS S.A.C., 2024)

Este procedimiento permite generar una imagen del perfil de rigidez del subsuelo, útil para determinar parámetros como V_s , el módulo de rigidez y, en estudios sísmicos, el valor de V_s 30

2.3.2.4 Procesamiento e interpretación de datos

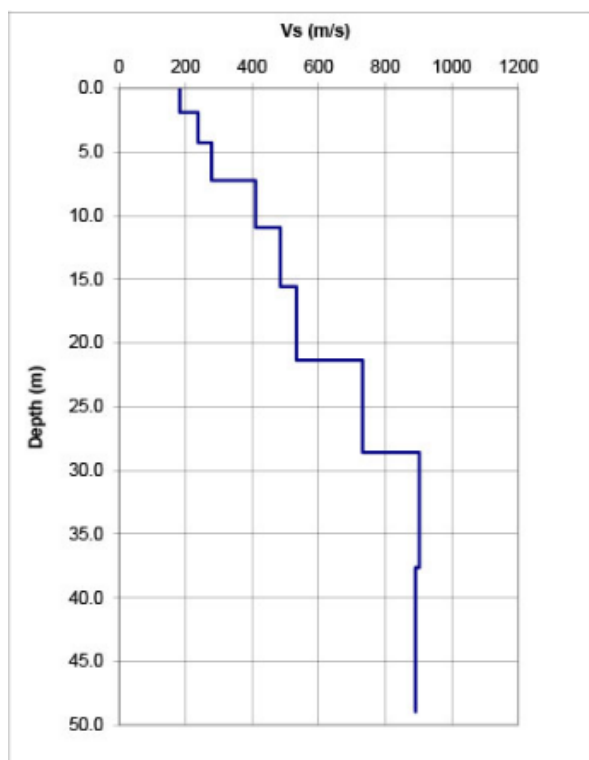
El procesamiento de datos en el método MASW tiene como objetivo transformar los registros de campo en un perfil de velocidades de onda de corte (V_s) en función de la profundidad, lo que permite interpretar la rigidez del subsuelo. Una vez obtenidas las señales registradas por los geófonos, el procesamiento se realiza en tres etapas principales:

1. **Generación del campo de ondas (registro multicanal):** A partir de los registros obtenidos en campo, se construye un gráfico denominado campo de ondas (wavefield), que muestra la evolución de las ondas Rayleigh en el tiempo y la distancia. Este archivo se convierte en la base para el análisis espectral.
2. **Transformación en curva de dispersión:** Se aplica un procesamiento espectral (como la Transformada de Fourier o f-k), que permite extraer la curva de dispersión de las ondas Rayleigh, es decir, la relación entre la velocidad de fase y la frecuencia. Esta curva refleja cómo varía la velocidad de propagación con la profundidad, ya que las frecuencias bajas penetran más profundamente y las altas se concentran cerca de la superficie.
3. **Inversión del modelo V_s :** A partir de la curva de dispersión obtenida, se realiza una inversión sísmica para calcular el perfil de velocidades de onda de corte (V_s). Este perfil muestra cómo varía la rigidez dinámica del terreno con la profundidad. En esta etapa también se pueden ajustar otros parámetros, como el espesor de cada capa y su densidad estimada. (MASW, 2009)

El resultado final es un modelo 1D o 2D de velocidades V_s , útil para estimar propiedades dinámicas como el módulo de rigidez G , el V_{s30} (velocidad promedio en los primeros 30 m) y para identificar capas blandas o zonas con condiciones especiales, como alta saturación o material suelto.

Figura 4

Velocidad de Onda S VS Profundidad



Nota. Reproducida de 1D MASW SHEAR WAVE VELOCITY TEST RESULTS, de Conetec, 2020. <https://www.conetec.com/es/servicios/ensayos-geof%C3%ADsicos/masw>

La interpretación de los datos se complementa con el conocimiento de los materiales típicos del sitio, ya que distintos tipos de suelo presentan rangos característicos de velocidad. Por ejemplo, suelos arcillosos blandos pueden presentar V_s por debajo de 200 m/s, mientras que suelos más compactos o parcialmente cementados pueden superar los 400 m/s.

2.3.2.5 Ventajas y limitaciones

2.3.2.5.1 Ventajas

- Método no destructivo y no invasivo: no requiere excavaciones ni alteración del suelo, lo que permite su uso en zonas urbanas, áreas sensibles o de difícil acceso.
- Capacidad para detectar capas de baja velocidad o inversiones de velocidad, incluso cuando se encuentran por debajo de capas más rígidas, lo cual representa una ventaja sobre otros métodos como la refracción sísmica.
- Aplicabilidad en sitios con ruido sísmico de fondo elevado, ya que la técnica se enfoca en ondas de frecuencia controlada y coherente.
- Posibilidad de generar perfiles de V_s en 1D o 2D, adaptando el procesamiento según los requerimientos del proyecto.
- Relativamente económico y ágil en comparación con métodos invasivos como Cross-Hole o Down-Hole.
- Útil para estudios de cimentaciones, estabilidad de taludes, diseño sísmico de edificaciones, presas, botaderos y canteras, entre otros. (GEORYS INGENIEROS S.A.C., 2024)

2.3.2.5.2 Limitaciones

- Limitada profundidad de investigación, usualmente entre 20 y 30 metros, dependiendo del arreglo y del contenido frecuencial de la fuente.
- Sensibilidad a topografía irregular: la calidad del resultado puede verse afectada si el tendido de geófonos se instala en terrenos con cambios de cota pronunciados.

- Requiere espacios relativamente despejados para el tendido de líneas, lo que puede limitar su uso en zonas urbanizadas o con obstáculos físicos.
- No detecta capas delgadas o con bajo contraste de rigidez, especialmente si están superpuestas entre materiales similares.
- Como método indirecto, sus resultados deben ser verificados o calibrados con métodos directos (como perforaciones o calicatas), especialmente si se requiere una validación de alta precisión.(GEORYS INGENIEROS S.A.C., 2024)

2.4 Influencia del nivel freático en estudios geofísicos

2.4.1 Comportamiento de las ondas en suelos saturados

La propagación de ondas sísmicas en suelos saturados presenta particularidades importantes en comparación con suelos secos o parcialmente saturados, debido a la influencia directa del contenido de agua en los poros sobre las propiedades dinámicas del medio.

Las ondas P (primarias o de compresión) se ven fuertemente afectadas por el grado de saturación del suelo. Cuando el contenido de agua en los poros es bajo, la presencia de aire reduce la eficiencia en la transmisión de las ondas compresionales. Sin embargo, al aumentar el grado de saturación, la velocidad de la onda P (V_p) aumenta bruscamente, ya que el agua, al ser prácticamente incompresible, facilita la propagación de estas ondas. Este comportamiento ha sido documentado en estudios experimentales, donde se observa que la intensidad y frecuencia de las ondas P también se incrementan al acercarse a la saturación completa, haciendo de V_p un posible indicador indirecto del nivel freático.

En cambio, las ondas S (de corte), que se transmiten a través de deformaciones tangenciales, no son transportadas por el agua, sino por el esqueleto sólido del suelo. Por ello, su velocidad está más relacionada con la rigidez del contacto entre partículas sólidas y se ve menos influida por la saturación. A plena saturación, la velocidad V_s permanece relativamente constante o incluso puede disminuir levemente si el agua reduce la fricción entre partículas. No obstante, si se incrementa la presión de confinamiento efectiva, el contacto entre partículas mejora, y como consecuencia, la velocidad V_s tiende a aumentar (Leong & Cheng, 2016).

Este comportamiento diferencial entre V_p y V_s es útil en estudios geofísicos, ya que permite inferir indirectamente la condición de saturación del subsuelo. Además, tiene un impacto directo sobre el cálculo de parámetros derivados, como el coeficiente de Poisson o el módulo de rigidez, los cuales también pueden servir como indicadores complementarios para identificar zonas con nivel freático elevado.

2.4.2 Efecto del agua subterránea en los métodos sísmicos

La presencia de agua subterránea afecta directamente la calidad y confiabilidad de los métodos geofísicos sísmicos, especialmente en la interpretación de perfiles de velocidad del subsuelo. Si bien el efecto físico de la saturación sobre las ondas ha sido ampliamente estudiado, su impacto en los resultados prácticos de métodos como la refracción sísmica o el MASW requiere atención específica.

En métodos basados en ondas P como la refracción sísmica, la saturación elevada puede provocar aumentos localizados en la velocidad, lo que puede interpretarse erróneamente como un

cambio litológico o una capa más rígida, cuando en realidad puede deberse a la presencia de agua. Por tanto, es crucial considerar el contexto hidrogeológico al analizar velocidades inusualmente altas.

Por otro lado, el método MASW, basado en ondas de corte, puede subestimar la rigidez real si el agua disminuye la fricción entre partículas, especialmente en suelos finos o mal compactados. Además, los contrastes de velocidad entre capas se atenúan en medios saturados, lo que puede reducir la resolución vertical del perfil generado.

En algunos casos, la presencia de agua también puede aumentar el contenido de frecuencias bajas en la señal, dificultando la identificación precisa de la dispersión en el análisis espectral. Esto representa un desafío técnico que puede afectar la profundidad de investigación y la confiabilidad del modelo invertido.

2.5 Clasificación de suelos

2.5.1 *Sistema SUCS: descripción y grupos*

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) clasifica los materiales en función de su tamaño de partícula y sus características plásticas, con base en ensayos de laboratorio como:

- Granulometría (tamizado y sedimentación)
- Límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico y índice de plasticidad)

Los suelos se dividen primero en dos grandes grupos:

1. **Suelos gruesos** (más del 50 % retenido en el tamiz #200):

- Gravas (G) y Arenas (S)
- Clasificados como bien graduados (W), mal graduados (P), con finos (M o C)

2. **Suelos finos** (más del 50 % pasa el tamiz #200):

- Limos (M) y Arcillas (C)
- Clasificados según su plasticidad: baja (L) o alta (H)

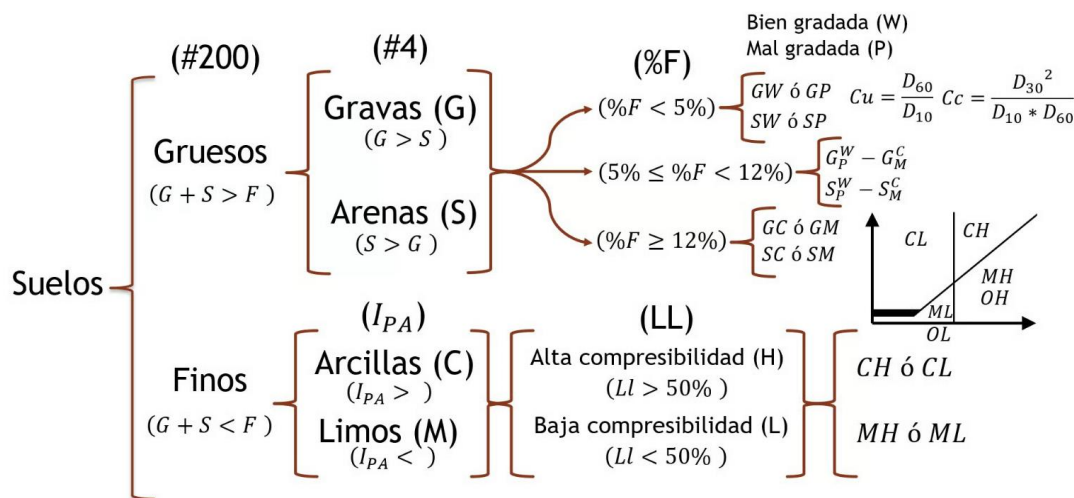
Cada suelo se designa con letras combinadas. Ejemplos:

- GW: grava bien graduada
- CL: arcilla de baja plasticidad
- SM: arena con contenido limoso
- CH: arcilla de alta plasticidad

Además, se utilizan cartas de plasticidad, como el diagrama de Casagrande, para distinguir entre suelos limosos y arcillosos en función del límite líquido e índice de plasticidad. (Ingeotecnia, 2025)

Figura 5

Resumen SUCS



Nota. Reproducida de ¿Qué es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)?, de Ingeotecnia, 2025. <https://www.ingeotecnia.com/sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-sucs>

Esta clasificación permite prever el comportamiento del suelo frente a cargas, agua o vibraciones, y es especialmente útil para correlacionar con parámetros geofísicos como V_s o V_p , ya que ciertos grupos (como las arcillas blandas) presentan velocidades características más bajas, mientras que los suelos granulares compactos suelen mostrar mayores valores de rigidez.

2.5.2 Ensayos de caracterización

Los ensayos de caracterización permiten determinar las propiedades físicas básicas de un suelo y son esenciales para su clasificación dentro del sistema SUCS. Estos ensayos permiten identificar el tipo de suelo, su comportamiento plástico, su textura, y establecer correlaciones con su respuesta geotécnica y dinámica. Los dos principales tipos de ensayos requeridos por el SUCS son el ensayo de granulometría junto con el ensayo de límites de Atterberg..

2.5.2.1 Ensayo de granulometría

Este ensayo determina la distribución del tamaño de las partículas del suelo. Para suelos gruesos (gravas y arenas), se utiliza el método de tamizado en seco (ASTM D422) mediante una serie de tamices normalizados. En suelos con partículas finas (limos y arcillas), se aplica además el método de hidrometría o sedimentación para estimar el porcentaje de material menor a 0.075 mm.

A partir de los resultados, se puede calcular:

- El diámetro efectivo (D_{10}), así como los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c), que sirven para evaluar la gradación del suelo.
- El porcentaje que pasa por el tamiz #200, parámetro clave para distinguir entre suelos gruesos y finos en la clasificación SUCS.

2.5.2.2 Ensayos de límites de Atterberg

Estos ensayos permiten determinar la plasticidad de los suelos finos, mediante tres estados clave de consistencia:

- Límite líquido (LL)
- Límite plástico (PL)
- Índice de plasticidad ($PI = LL - PL$)

Los valores obtenidos se utilizan para ubicar el suelo en la carta de plasticidad de Casagrande, que permite distinguir entre limos y arcillas, y entre suelos de baja o alta plasticidad. Este procedimiento es esencial para la correcta clasificación de suelos finos en los grupos CL, CH, ML y MH.

2.5.3 Aplicación del SUCS en estudios geofísicos e hidrológicos

En el contexto de estudios geofísicos, la clasificación SUCS no se obtiene directamente mediante métodos indirectos como la refracción sísmica o el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), ya que estos ensayos no determinan características como la granulometría o los límites de Atterberg. Sin embargo, los parámetros obtenidos mediante métodos sísmicos, como la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) o de compresión (V_p), permiten hacer inferencias sobre la rigidez y estratigrafía del subsuelo.

Aunque no existe una correspondencia directa entre los grupos SUCS y los valores de velocidad sísmica, se han observado tendencias generales: suelos finos de alta plasticidad, como arcillas (CH), tienden a mostrar valores bajos de V_s , mientras que suelos granulares bien compactados, como gravas (GW) o arenas densas (SW), presentan mayores velocidades. Estas observaciones deben interpretarse con cautela, ya que la velocidad de las ondas también depende de factores como la humedad, la compactación y la presión de confinamiento.

En este sentido, la clasificación SUCS puede emplearse como un elemento complementario para verificar o contrastar la interpretación de los perfiles geofísicos. Por ejemplo, si una calicata indica la presencia de una arena densa (SP o SW), se esperaría que la velocidad sísmica en ese tramo sea considerablemente mayor que la de una capa de arcilla blanda (CL o CH). Esta comparación puede contribuir a validar los modelos obtenidos a partir de los métodos indirectos.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la clasificación SUCS también ofrece información útil sobre la permeabilidad relativa de los materiales. Suelos granulares limpios (GW, SW) suelen ser altamente permeables, facilitando el flujo subterráneo, mientras que los suelos finos (CH, MH) tienden a ser poco permeables y pueden actuar como barreras hidráulicas. Esta información resulta clave para interpretar la dinámica del nivel freático y evaluar su posible influencia sobre las velocidades sísmicas.

CAPITULO 3

ENSAYOS GEOFÍSICOS

Objetivos de los ensayos

3.1.1 Objetivo General

Los ensayos geofísicos aplicados en esta investigación tienen como propósito principal caracterizar el subsuelo de forma indirecta, mediante la medición y análisis de propiedades dinámicas del terreno. Estas propiedades permiten identificar cambios estratigráficos, estimar parámetros de rigidez y evaluar el comportamiento del suelo en presencia de agua subterránea.

3.1.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de los ensayos son:

- Determinar la velocidad de propagación de las ondas sísmicas (ondas P y S) en diferentes capas del subsuelo, utilizando los métodos de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW).
- Identificar la disposición estratigráfica del terreno, reconociendo la existencia de capas con distintos grados de rigidez o compactación.
- Obtener perfiles de velocidad en profundidad, que sirvan como insumo para interpretar las condiciones geotécnicas del sitio, especialmente en relación con la posible influencia del nivel freático.
- Comparar e interpretar los resultados obtenidos con los métodos geofísicos frente a la información directa de calicatas, a fin de validar o complementar los datos obtenidos mediante ambas técnicas.

- Analizar el comportamiento dinámico del suelo a partir de las velocidades registradas, calculando parámetros como el módulo de rigidez y el coeficiente de Poisson.

3.2 Ubicación de los ensayos

3.2.1 Localización general

Los ensayos geofísicos se realizaron en el sector urbano correspondiente a la parroquia Machángara, cantón Cuenca, provincia del Azuay. Esta zona se ubica dentro del valle interandino, a una altitud promedio de aproximadamente 2335.3 metros sobre el nivel del mar (msnm), según las cotas registradas en las coordenadas UTM tomadas en campo. El terreno presenta una cobertura vegetal superficial compuesta principalmente por pasto, característica común en zonas no construidas de la región. No se identificaron indicios visibles de rellenos recientes ni intervenciones superficiales significativas, lo cual sugiere que el suelo conserva condiciones relativamente naturales en su estado superficial. La selección de esta área respondió tanto a la facilidad de acceso como al interés de evaluar el comportamiento del subsuelo en un entorno urbano, en el marco de estudios hidrogeológicos y geotécnicos.

3.2.2 Zonas de ensayo

Se realizaron mediciones en cinco zonas dentro de un mismo sector urbano, separadas entre sí por distancias cortas, de entre 25 a 60 metros. Cada zona fue evaluada de forma independiente mediante perfiles geofísicos, con el fin de analizar la variabilidad local del subsuelo. La cercanía entre los puntos permite contrastar las respuestas dinámicas del terreno a pequeña escala y obtener una mejor caracterización del comportamiento estratigráfico en el área de estudio.

La siguiente tabla resume las coordenadas UTM y las cotas aproximadas de cada zona de ensayo. Cabe mencionar que las coordenadas están referidas al huso 17S del sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator).

Tabla 2

Coordenadas y Cotas de las Zonas de Ensayo

# Ensayo	Coordenada UTM, X [m]	Coordenada UTM, Y [m]	Altura [msnm]
1	734411	9685190.6	2335.1
2	734435.2	9685199.7	2334.9
3	734464.5	9685203.9	2334.2
4	734396.7	9685162.9	2335.8
5	734338.6	9685156.8	2336.5

3.2.3 *Mapa general de ubicación*

Para complementar la información espacial de los ensayos, se elaboró un mapa de ubicación general utilizando imágenes satelitales de la plataforma Google Earth. En dicho mapa se identifican las cinco zonas de medición mediante marcadores georreferenciados, permitiendo visualizar su distribución dentro del área de estudio.

La imagen muestra una vista aérea del sector urbano correspondiente a la parroquia Machángara, con los puntos de ensayo señalados y etiquetados de forma individual (Zona 1, Zona 2, etc.). Esta representación facilita la interpretación espacial de los resultados geofísicos en relación con el entorno inmediato.

A continuación, se presenta la imagen referencial:

Figura 6

Imagen Referencial con las Zonas de Ensayo



3.3 Procedimiento de campo

Los ensayos sísmicos de campo combinaron simultáneamente el método de refracción sísmica y el de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), utilizando un único montaje de adquisición. Ambos métodos se basan en el registro de ondas generadas de forma activa, por lo que fue posible capturar los datos requeridos para los dos análisis mediante un solo tendido de sensores y un único conjunto de impactos. La ejecución de estos ensayos se realizó el día 28 de marzo del presente año, entre las 10:30 y 14:00 horas, en una zona urbana con cobertura de pasto, ubicada en la parroquia Machángara del cantón Cuenca. El lugar de medición se situaba por debajo

del nivel de la carretera Panamericana Cuenca–Azogues, lo cual generó un nivel moderado de ruido ambiental debido al tránsito vehicular.

3.3.1 Instrumentación utilizada

La adquisición se realizó utilizando el siguiente equipamiento:

- Un sistema de adquisición sísmica multicanal, controlado mediante un dispositivo portátil tipo tableta.
- Una línea de 24 sensores sísmicos (geófonos) conectados en serie mediante un cable multicanal.
- Una placa metálica rígida como punto de impacto para la fuente sísmica.
- Un mazo de alta masa, operado manualmente, para la generación de las ondas.

El registro de datos fue coordinado por un técnico especializado de la empresa Geo&Geo, quien operó el sistema de adquisición y supervisó el montaje. La instalación de los sensores y la ejecución de los impactos contaron con el apoyo de dos asistentes externos, colaboradores gestionados por el autor.

3.3.2 Configuración del tendido

Para la adquisición de datos sísmicos, se utilizó un arreglo lineal de 24 geófonos verticales, conectados mediante un cable multicanal dispuesto sobre el terreno natural. Los sensores fueron insertados manualmente asegurando buena adherencia al suelo, con separación uniforme entre cada uno, dependiendo de la zona de estudio.

Se emplearon dos configuraciones distintas de espaciamiento. En las zonas 1, 2 y 5 se usó un espaciado de 1.0 metro entre geófonos, mientras que en las zonas 3 y 4 se redujo a 0.5 metros (dando un total de separación entre el primer y último geófono, de 23 y 11.5 m respectivamente), con el fin de mejorar la resolución en zonas de menor profundidad esperada.

En todos los casos, el tendido incluyó segmentos de prolongación fuera del arreglo activo (off-end), necesarios para registrar adecuadamente las ondas refractadas y optimizar el análisis MASW.

3.3.3 Procedimiento de adquisición

La generación de ondas sísmicas se realizó mediante impactos verticales con un mazo metálico sobre una placa rígida, en ubicaciones distribuidas estratégicamente a lo largo del tendido. En total, se ejecutaron siete disparos (shots) por cada zona, con el objetivo de garantizar una cobertura adecuada para el análisis de refracción sísmica y MASW.

El procedimiento fue el siguiente:

- **Shot 1 y Shot 7:** Ubicados a una distancia equivalente a $1/6$ de la longitud total del tendido, hacia el exterior del primer y último geófono respectivamente.
- **Shot 2 y Shot 6:** Colocados a una distancia igual a la mitad del espaciamiento entre geófonos, también hacia fuera del primer y último geófono.
- **Shot 3:** Posicionado entre los geófonos 6 y 7
- **Shot 4:** Posicionado entre los geófonos 12 y 13
- **Shot 5:** Posicionado entre los geófonos 18 y 19

Tabla 3*Ubicación de los Disparos según la Configuración del Tendido*

Zonas	Espac. [m]	Long. [m]	Shots 1 y 7 [m]	Shots 2 y 6 [m]	Shot 3 [m]	Shots 4 [m]	Shot 5 [m]
1, 2, 5	1.0	23	4.0 m fuera de #1 y #24	0.5 m fuera de #1 y #24	#6~7	#12~13	#18~19
3, 4	0.5	11.5	2.0 m fuera de #1 y #24	0.25 m fuera de #1 y #24	#6~7	#12~13	#18~19

En el capítulo 5, se analizará los resultados obtenidos a partir del procesamiento de estos ensayos geofísicos.

CAPITULO 4

CALICATAS Y RECONOCIMIENTO DIRECTO

4.1 4.1 Procedimiento de campo

Con el objetivo de complementar la caracterización indirecta del subsuelo obtenida mediante métodos geofísicos, se llevó a cabo un reconocimiento directo mediante la excavación de cinco calicatas distribuidas en las mismas zonas donde se realizaron los perfiles sísmicos. Este procedimiento permitió observar de manera directa las características estratigráficas del terreno, así como la identificación visual de los distintos tipos de suelo y la localización del nivel freático.

La excavación de las calicatas fue realizada el día viernes 04 de abril de 2025, exactamente una semana después de la ejecución de los ensayos geofísicos. Los trabajos se llevaron a cabo con el apoyo de la empresa Geo&Geo, la cual proporcionó la maquinaria, personal técnico y los registros detallados de cada calicata. Las excavaciones se efectuaron utilizando una retroexcavadora, lo que permitió optimizar el tiempo y garantizar una mayor profundidad y estabilidad en cada apertura.

El procedimiento inició en la zona 1 a las 10:35 a.m. y concluyó con la excavación de la zona 5 a las 12:40 p.m. Todas las calicatas se ubicaron en los mismos puntos definidos previamente para los ensayos geofísicos, según se indica en la Tabla 2 (Capítulo 3), respetando sus respectivas coordenadas.

Durante la ejecución, se registraron observaciones visuales de los estratos y se tomó evidencia fotográfica en cada una de las cinco calicatas planificadas. Adicionalmente, se excavó

una calicata complementaria (Calicata 6) en una ubicación cercana, en la cual se recolectó una muestra para fines ilustrativos y se realizó el correspondiente análisis de laboratorio, permitiendo su clasificación mediante el sistema SUCS. La información técnica de las calicatas 1 a 5 fue proporcionada por Geo&Geo en formato físico, mediante cinco fichas individuales con las observaciones de campo respectivas.

La descripción detallada de cada calicata, incluyendo profundidad, dimensiones, nivel freático, identificación visual de los estratos, así como una representación gráfica simplificada del perfil estratigráfico general de las cinco excavaciones, se presenta en la sección siguiente.

4.2 Descripción técnica de las calicatas

En esta sección se presenta la información técnica recopilada a partir de las cinco calicatas excavadas en el área de estudio.

4.2.1 Calicata 1

4.2.1.1 Datos

- **Profundidad:** 2.9 m
- **Longitud:** 1.8 m
- **Ancho:** 0.80 m
- **Nivel Freático:** 2.50

4.2.1.2 Observaciones de la calicata

En la siguiente tabla se describe las observaciones encontradas:

Tabla 3

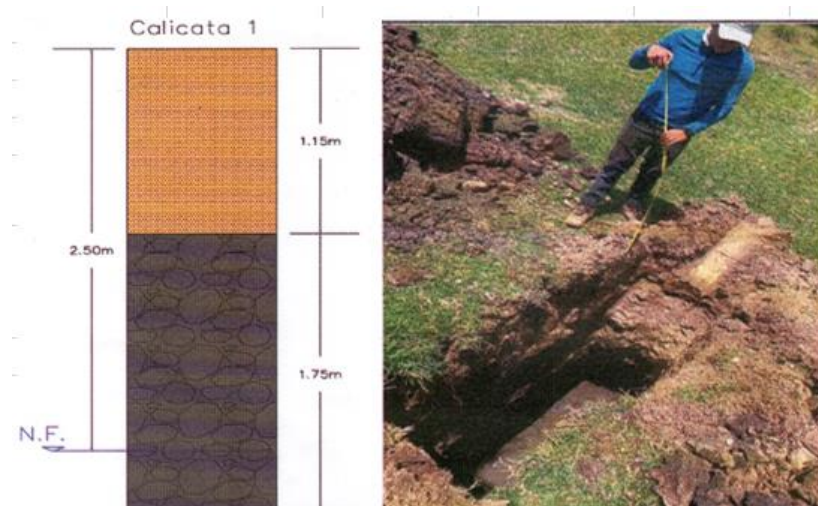
Observaciones de la Calicata 1

# Estrato	Profundidad [m]	Descripción Visual del Material
Estrato 1	0.00 - 1.15	Material color café, con tamaño de grano pequeño (arena-arcilla-limo) contiene humedad, no presenta plasticidad. Gravitas de tamaño 2-3cm redondeadas, buen sorteo, material no consolidado).
Estrato 2	1.15 - 2.90	Material color gris verdoso, saturado, alta humedad, plástico, contiene arena y limos, contenido orgánico por olor. Gravitas de tamaño moderado >10cm de forma redondeada, se encuentra el nivel freático.

4.2.1.3 Perfil estratigráfico simplificado y registro fotográfico

Figura 7

Perfil Estratigráfico y Registro Fotográfico



4.2.2 Calicata 2

4.2.2.1 Datos

- **Profundidad:** 2.85 m
- **Longitud:** 1.80 m
- **Ancho:** 0.80 m
- **Nivel Freático:** 2.80 m

4.2.2.2 Observaciones de la calicata

En la siguiente tabla se describe las observaciones encontradas:

Tabla 4

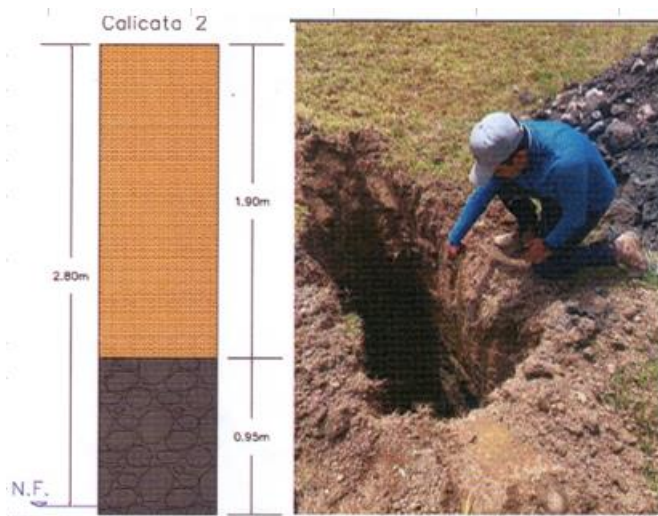
Observaciones de la Calicata 2

# Estrato	Profundidad [m]	Descripción Visual del Material
Estrato 1	0.00 - 1.9	Material color café, arena con poca (arcilla-limo), baja humedad, no presenta plasticidad, gravas menores a 2cm de diámetro.
Estrato 2	1.9 - 2.85	Material color negro, arena con contenido de arcilla-limo, presenta alta humedad, plasticidad, gravas mayores a 3-5cm, material orgánico por olor, gravas esféricas.

4.2.2.3 Perfil estratigráfico simplificado y registro fotográfico

Figura 8

Perfil Estratigráfico y Registro Fotográfico



4.2.3 Calicata 3

4.2.3.1 Datos

- **Profundidad:** 3.1 m
- **Longitud:** 1.9 m
- **Ancho:** 0.82 m
- **Nivel Freático:** 2.6 m

4.2.3.2 Observaciones de la calicata

En la siguiente tabla se describe las observaciones encontradas:

Tabla 5

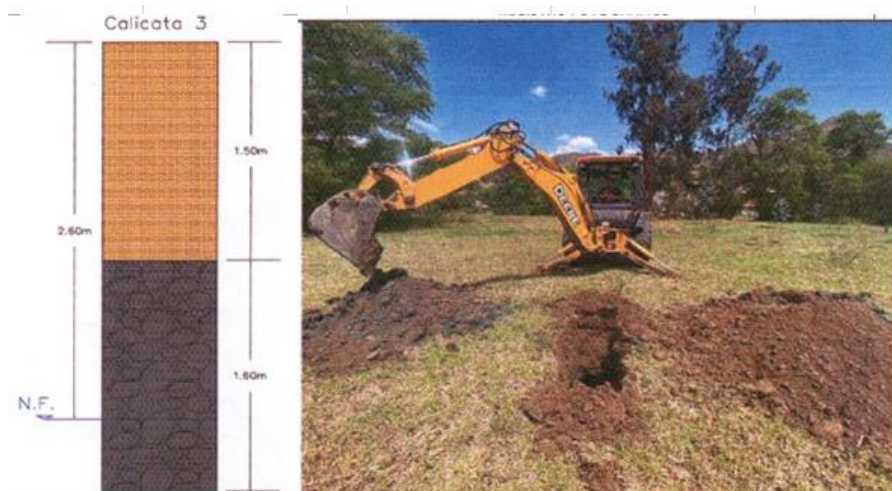
Observaciones de la Calicata 3

# Estrato	Profundidad [m]	Descripción Visual del Material
Estrato 1	0.00 - 1.5	Material color café, arena con poca (arcilla-limo), baja humedad, no presenta plasticidad, gravas menores a 2cm de diámetro.
Estrato 2	1.5 – 3.1	Material color negro, arena con contenido de arcilla-limo, presenta alta humedad, plasticidad, gravas mayores a 3-5cm, material orgánico por olor, gravas esféricas.

4.2.3.3 Perfil estratigráfico simplificado y registro fotográfico

Figura 9

Perfil Estratigráfico y Registro Fotográfico



4.2.4 Calicata 4

4.2.4.1 Datos

- **Profundidad:** 2.55 m
- **Longitud:** 1.75 m
- **Ancho:** 0.83 m
- **Nivel Freático:** 2.40 m

4.2.4.2 Observaciones de la calicata

En la siguiente tabla se describe las observaciones encontradas:

Tabla 6

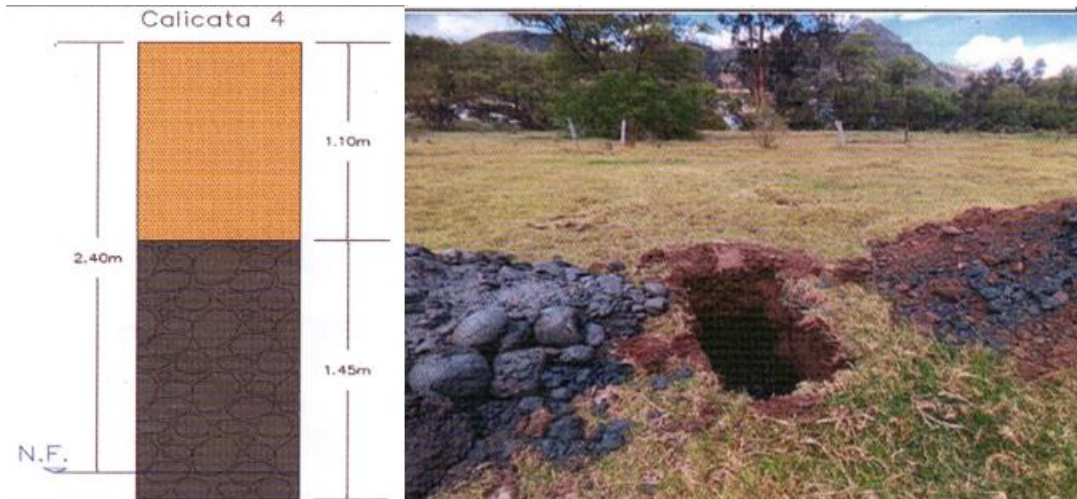
Observaciones de la Calicata 4

# Estrato	Profundidad [m]	Descripción Visual del Material
Estrato 1	0.00 - 1.10	Material café arenoso grano medio-fino con matriz arcilla/limo no plástico y gravas redondeadas de 2 a 3cm, con presencia de humedad.
Estrato 2	1.10 - 2.55	Material gris: arcilla/limo plástico, contiene arena y gravas redondeadas >10cm.

4.2.4.3 Perfil estratigráfico simplificado y registro fotográfico

Figura 10

Perfil Estratigráfico y Registro Fotográfico



4.2.5 Calicata 5

4.2.5.1 Datos

- **Profundidad:** 2.90 m
- **Longitud:** 1.90 m
- **Ancho:** 0.80 m
- **Nivel Freático:** 2.20 m

4.2.5.2 Observaciones de la calicata

En la siguiente tabla se describe las observaciones encontradas:

Tabla 7

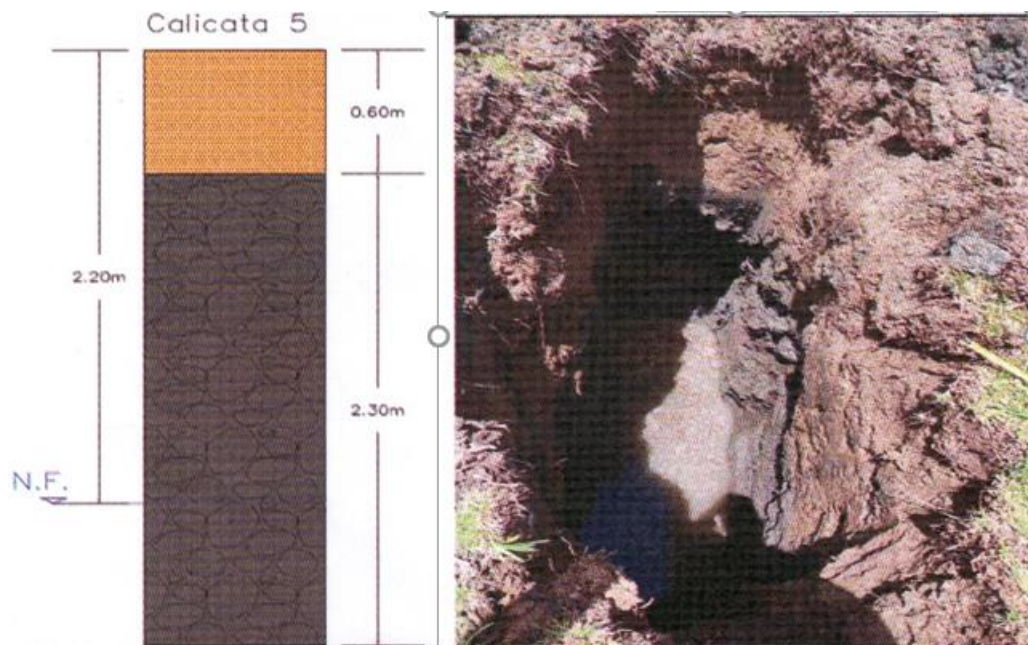
Observaciones de la Calicata 5

# Estrato	Profundidad [m]	Descripción Visual del Material
Estrato 1	0.00 – 0.6	Material café arenoso grano medio-fino con matriz arcilla/limo no plástico y gravas redondeadas de 2 a 3cm, con presencia de humedad.
Estrato 2	0.6 - 2.90	Material gris: arcilla/limo plástico, contiene arena y gravas redondeadas >10cm.

4.2.5.3 Perfil estratigráfico simplificado y registro fotográfico

Figura 11

Perfil Estratigráfico y Registro Fotográfico



4.3 Clasificación SUCS

Si bien el planteamiento inicial consideraba la caracterización de los suelos excavados mediante ensayos de laboratorio para su posterior clasificación bajo el sistema SUCS, por razones logísticas y de disponibilidad de muestras, solo se obtuvo un análisis completo de granulometría correspondiente a una calicata adicional no contemplada originalmente en la planificación (Calicata 6).

Esta muestra, obtenida por la empresa Geo&Geo, corresponde al material más superficial de dicha calicata y, de acuerdo con las descripciones visuales y condiciones de campo registradas en el capítulo 4, presenta similitudes con el estrato 1 observado en las zonas 1 y 4, particularmente en color, textura y comportamiento aparente. Por esta razón, y aunque no corresponde a una zona con datos geofísicos registrados, se ha considerado pertinente incluir este análisis como referencia complementaria dentro del presente estudio.

La caracterización de esta muestra permite ilustrar el procedimiento de análisis de suelos según el sistema SUCS, aportando un ejemplo del tipo de información que puede vincularse con los resultados geofísicos en futuras investigaciones más completas.

Figura 12*Análisis Granulométrico Calicata 6 según Norma ASTM D1140*

# de Tamiz	Abertura	Peso de material retenido [gr]	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
N. 1	25.4	0.0	0.0%	0.0%	100.0%
N. 3/4	19	0.0	0.0%	0.0%	100.0%
N. 3/8	9.5	11.1	1.2%	1.2%	98.8%
N. 4	4.76	15.5	1.7%	2.9%	97.1%
N. 10	2.00	41.4	4.5%	7.5%	92.5%
N. 20	0.84	104.7	11.5%	19.0%	81.0%
N. 40	0.43	155.8	17.1%	36.1%	63.9%
N.60	0.26	142.4	15.6%	51.7%	48.3%
N.140	0.11	154.9	17.0%	68.7%	31.3%
N. 200	0.08	32.6	3.6%	72.3%	27.7%
Fondo		0.7	0.1%		
Finos lavado		251.2	27.6%		
TOTAL		910.3			

Peso Inicial antes de tamizar	910.27	HUMEDAD NATURAL	
Cálculo de error	0.003%	PESO HUM.	1032.97
Valor de corrección	0	PESO SECO	910.27
Tamiz de corrección	-	% HUMEDAD	13.5%
		M. de finura arena	2.58

Peso muestra [gr]	Peso Grava [gr]	Peso Arena [gr]	Peso Finos [gr]
910.27	26.60	631.80	251.90
100.0%	2.9%	69.4%	27.7%

El sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) representa una herramienta técnica ampliamente utilizada en la caracterización de materiales del subsuelo. No obstante, en el presente estudio, la aplicación de este sistema no constituye el eje central de análisis, dado que no se dispuso de muestras de laboratorio representativas para las calicatas vinculadas a los perfiles geofísicos. Por tanto, no se realizó una clasificación SUCS completa para las zonas 1 a 5.

En su lugar, la interpretación del subsuelo se ha fundamentado principalmente en la descripción visual directa de los estratos excavados, apoyada por evidencia fotográfica y fichas de campo proporcionadas por la empresa Geo&Geo. Este tipo de observación incluyó criterios como color, textura, humedad, cohesión aparente, y la presencia o ausencia de nivel freático, lo cual permitió establecer una base adecuada para el análisis posterior de los parámetros físicos registrados mediante ensayos sísmicos.

Como complemento técnico, se incluye el análisis granulométrico correspondiente a una muestra recolectada en una calicata adicional (Calicata 6), ubicada en un sector cercano a las zonas 1 y 4. Esta muestra fue sometida a un estudio de laboratorio independiente, no contemplado inicialmente, y su información se presenta solo con fines ilustrativos.

De acuerdo con los resultados de la curva granulométrica, más del 50 % del material fue retenido en el tamiz N° 200, clasificándose como un suelo grueso. A su vez, más del 50 % de esta fracción gruesa pasó el tamiz N° 4, ubicando al material dentro del grupo de arenas. El contenido de finos fue de 27.7 %, lo cual excede el 12 % establecido por el sistema SUCS como umbral para diferenciar materiales con influencia significativa de finos.

Bajo estas condiciones, el suelo se restringe al rango de SM (arena limosa) o SC (arena arcillosa), en función de los límites de plasticidad de los finos.

Este resultado no se considera representativo de todas las zonas analizadas, pero sí aporta una referencia útil para futuras investigaciones que deseen correlacionar directamente parámetros geotécnicos con métodos indirectos como la refracción sísmica o el análisis MASW. En el contexto del presente trabajo, el análisis se orienta principalmente hacia la evaluación de variables físicas derivadas de los ensayos geofísicos, tales como la velocidad de propagación de ondas (V_s y V_p), el peso específico del material, el módulo de elasticidad, el módulo de corte γ , de forma destacada, el coeficiente de Poisson. Estas propiedades serán obtenidas a partir de relaciones teóricas y constituyen la base del capítulo siguiente, donde se abordará su procesamiento y su relación con la presencia del nivel freático.

CAPITULO 5

PROCESAMIENTO DE VARIABLES FÍSICAS

5.1 Datos base obtenidos de los ensayos geofísicos

Los datos primarios utilizados en este capítulo provienen de los ensayos geofísicos realizados en campo mediante dos métodos principales: refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW). A partir del procesamiento de las señales registradas, fue posible obtener de manera directa las velocidades de propagación de las ondas sísmicas compresionales (V_p) y de ondas de corte (V_s) en cada una de las zonas analizadas.

Estas velocidades constituyen la base para la estimación de variables físicas del suelo mediante relaciones teóricas previamente presentadas en el capítulo de fundamentos. Las propiedades derivadas incluyen:

- Peso específico (γ)
- Módulo de elasticidad (E)
- Módulo de corte (G)
- Módulo o coeficiente de Poisson (ν)

Si bien todas estas variables pueden calcularse con base en las velocidades obtenidas, la presente investigación se enfoca particularmente en el análisis del coeficiente de Poisson, dado su potencial para reflejar la influencia del nivel freático en los resultados geofísicos. La hipótesis técnica sugiere que, en zonas saturadas, la relación entre V_p y V_s puede alterar significativamente el valor de ν , ofreciendo así una herramienta indirecta para detectar o confirmar la presencia de agua subterránea.

Las demás variables mencionadas se presentan como resultados complementarios, cuyo cálculo es posible como parte del procesamiento estándar de datos, pero no constituyen el eje analítico de esta tesis. En ese sentido, pueden ser de utilidad en investigaciones futuras orientadas a modelar o evaluar el comportamiento dinámico completo del suelo a partir de métodos no destructivos.

5.2 Análisis de perfiles de velocidad y profundidad

Los resultados obtenidos mediante los ensayos de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) se presentan en forma de perfiles gráficos que relacionan la velocidad de propagación de ondas sísmicas (V_p y V_s) con la profundidad. Estas representaciones constituyen la base para la identificación de estratos diferenciados y el posterior cálculo de propiedades dinámicas del suelo.

Dado que cada método tiene distinta capacidad de penetración y resolución, fue necesario escalar y ajustar los perfiles de ambos ensayos, de manera que los tramos analizados fueran comparables en términos de profundidad. En algunos casos, los perfiles de refracción sísmica presentaron una profundidad menor a la alcanzada mediante MASW, por lo que se consideró únicamente la zona de intersección válida entre ambos métodos para asegurar coherencia en el análisis.

Dentro de estos perfiles, se observaron variaciones abruptas o graduales en las velocidades de onda, que permitieron identificar cambios en las propiedades del suelo. Para efectos del procesamiento, cada vez que se registró una variación significativa de velocidad en función de la

profundidad (y siempre que estuviera respaldada por datos disponibles en ambos métodos), se consideró como un límite de estrato o zona de análisis.

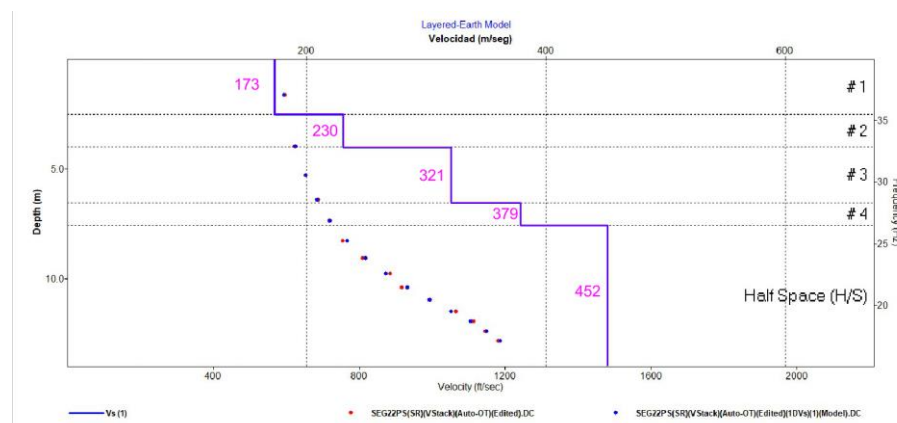
Este criterio fue aplicado de forma sistemática en todas las zonas estudiadas, permitiendo delimitar segmentos específicos del perfil a los cuales se les asignó un valor representativo de V_p y V_s . A partir de estos valores, y en conjunto con la información proveniente de las calicatas (especialmente el nivel freático observado), se procedió posteriormente al cálculo de las variables físicas del suelo, tal como se detalla en la siguiente sección.

5.2.1 Ejemplo de selección de profundidades y velocidades para el análisis de las variables físicas

Para ilustrar el procedimiento aplicado para la selección de velocidades sísmicas y su correspondiente profundidad, se toma como ejemplo el perfil de la zona 1. Este ejemplo refleja el método utilizado para el procesamiento y la comparación de los resultados obtenidos con MASW y refracción sísmica.

Figura 13

Perfil MASW de Velocidad vs Profundidad Obtenido de la Zona 1

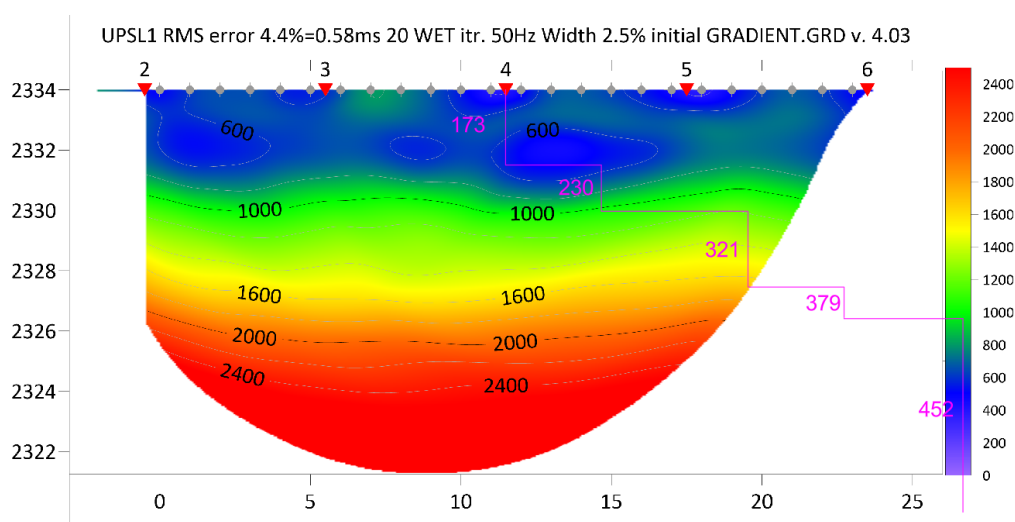


Primero, en la Figura 13 se presenta el perfil original obtenido del análisis MASW, el cual consiste en una representación escalonada de la velocidad de onda de corte (V_s) en función de la profundidad. Esta imagen fue escalada en AutoCAD para facilitar la medición precisa de los rangos de profundidad correspondientes a cada cambio de velocidad. Sobre esta figura se añadieron manualmente los valores promedio de V_s para cada tramo horizontal del perfil, que representan los distintos estratos del suelo identificados.

A continuación, en la Figura 14, se muestra la imagen del perfil de refracción sísmica (V_p), a la cual se le montó el perfil MASW sobre el mismo eje de profundidad del perfil de la sísmica, permitiendo la comparación directa entre ambas velocidades. Esta superposición se utilizó para identificar las velocidades de onda P correspondientes a los mismos intervalos de profundidad previamente definidos en el perfil de V_s .

Figura 13

Perfil Refracción Sísmica de Velocidad vs Profundidad de la Zona 1 Modificado



El análisis se centró en delimitar tramos con comportamiento uniforme en el perfil MASW, considerando los escalones horizontales como límites de estratos. Para cada uno de estos tramos se asignó un valor representativo de Vs (onda de corte) y se identificó el valor medio de Vp (onda P) en el gráfico correspondiente, dentro del mismo rango de profundidad.

La Tabla 8 presenta los intervalos seleccionados, junto con las velocidades representativas de Vs (del MASW) y Vp (de la refracción sísmica), que servirán como base para el cálculo de variables físicas como el módulo de elasticidad, módulo de corte, coeficiente de Poisson y peso específico.

Tabla 8

Velocidades Representativas de Vp y Vs para cada Profundidad en la Zona 1

Profundidad [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]
0~2.5	600	173
2.5~4	800	230
4~6.5	1400	321
6.5~7.6	1800	379
7.6~12.75	2400	452

Este procedimiento fue aplicado de forma similar en las demás zonas de estudio, ajustando los intervalos según los cambios observados en los perfiles de velocidad. Las figuras completas (originales y montadas) se encuentran disponibles en los anexos como respaldo visual del análisis.

5.3 Cálculo de variables físicas

Con base en los valores representativos de V_s y V_p determinados para cada estrato en las zonas de estudio, se calcularon las propiedades físicas del suelo relevantes para el análisis posterior. En esta sección se presentan únicamente los resultados obtenidos de dichos cálculos, organizados por zona.

Las variables estimadas incluyen el módulo de corte (G), módulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (ν) y el peso específico (γ), y serán empleadas principalmente en el capítulo siguiente para el análisis de su posible relación con la presencia del nivel freático.

Tabla 9

Variables Físicas Calculadas a Partir de V_p y V_s según los Estratos para la Zona 1

Estrato [m]	V_p [m/s]	V_s [m/s]	Peso Específico γ [kN/m ³]	Módulo de Poisson ν	Módulo de Elasticidad E [MPa]	Módulo de Corte G [MPa]
0~2.5	600	173	15.59	0.45	138	48
2.5~4	800	230	16.75	0.45	263	90
4~6.5	1400	321	18.20	0.47	563	191
6.5~7.6	1800	379	18.97	0.48	820	278
7.6~12.75	2400	452	19.83	0.48	1223	413

Tabla 10*Variables Físicas Calculadas a Partir de Vp y Vs según los Estratos para la Zona 2*

Estrato [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	Peso Específico γ [kN/m ³]	Módulo de Poisson ν	Módulo de Elasticidad E [MPa]	Módulo de Corte G [MPa]
0~2.45	380	245	17.01	0.14	238	104
2.75~4.05	850	221	16.58	0.46	241	82
4.05~8.5	1200	274	17.49	0.47	394	134

Tabla 11*Variables Físicas Calculadas a Partir de Vp y Vs según los Estratos para la Zona 3*

Estrato [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	Peso Específico γ [kN/m ³]	Módulo de Poisson ν	Módulo de Elasticidad E [MPa]	Módulo de Corte G [MPa]
0 ~1.45	350	134	14.63	0.41	76	27
1.45 ~2.08	500	103	13.70	0.48	44	15
2.08 ~6.65	1200	124	14.35	0.49	67	22
6.65 ~8.35	2700	177	15.68	0.50	150	50

Tabla 12*Variables Físicas Calculadas a Partir de Vp y Vs según los Estratos para la Zona 4*

Estrato [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	Peso Específico γ [kN/m ³]	Módulo de Poisson ν	Módulo de Elasticidad E [MPa]	Módulo de Corte G [MPa]
0 ~0.95	200	68	12.35	0.43	17	6
0.95~1.48	350	75	12.65	0.48	21	7
1.48~2.35	600	112	13.99	0.48	53	18
2.35~4.37	1000	155	15.17	0.49	110	37
4.37~8.3	2500	191	15.99	0.50	178	59

Tabla 13

Variables Físicas Calculadas a Partir de Vp y Vs según los Estratos para la Zona 5

Estrato [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	Peso Específico γ [kN/m³]	Módulo de Poisson ν	Módulo de Elasticidad E [MPa]	Módulo de Corte G [MPa]
0~0.95	350	159	15.27	0.37	108	39
0~0.6	400	95	13.42	0.47	36	12
0.6~2.48	600	170	15.53	0.46	133	46
2.48~8.6	1200	315	18.12	0.46	536	183

Las propiedades físicas mostradas en las tablas anteriores constituyen la base para evaluar la influencia de factores como la saturación del suelo y la presencia del nivel freático en los resultados obtenidos mediante los métodos geofísicos aplicados. En el siguiente capítulo se abordará este análisis comparativo, buscando identificar posibles correlaciones entre las características del suelo y los parámetros sísmicos registrados.

CAPITULO 6

ANÁLISIS COMPARATIVO

6.1 Comparación entre métodos geofísicos y calicatas

6.1.1 Zona 1

Para la Zona 1, se obtuvieron los valores de velocidad de onda de corte (V_s) y velocidad de onda de compresión (V_p) en función de los diferentes estratos, a partir de los perfiles procesados del estudio MASW y de refracción sísmica, respectivamente. Posteriormente, se calculó el módulo de Poisson con base en estas velocidades, obteniendo valores que oscilan entre 0.45 y 0.48 para todos los estratos analizados.

La calicata correspondiente a esta zona reportó el nivel freático a 2.5 metros de profundidad, por lo cual se esperaría que los estratos superiores a dicha profundidad mostraran valores más bajos de Poisson (en el orden de 0.2–0.35), mientras que los estratos por debajo podrían presentar valores superiores a 0.45, indicando alta saturación.

Sin embargo, en este caso particular, incluso el primer estrato (0–2.5 m) presenta un valor de Poisson igual a 0.45, lo que sugiere una posible saturación desde superficie o al menos desde una profundidad menor a la registrada visualmente. A partir del segundo estrato en adelante, los valores de Poisson se mantienen elevados (0.45–0.48), lo cual es coherente con una condición saturada por debajo del nivel freático observado.

Esta tendencia coincide además con el aumento progresivo de las velocidades V_p y V_s conforme se incrementa la profundidad, reforzando la interpretación de un medio más denso y saturado en los estratos inferiores.

6.1.2 Zona 2

En la Zona 2, la calicata registró el nivel freático a una profundidad de 2.8 metros. Según los resultados geofísicos obtenidos, el módulo de Poisson varía notablemente entre estratos, lo que permite observar un patrón muy marcado asociado a la presencia de agua.

El primer estrato (0–2.45 m) presenta un valor de Poisson de apenas 0.14, muy bajo en comparación con los demás estratos, lo cual es consistente con un suelo seco o no saturado. Este valor está dentro del rango típico de materiales granulares secos o con baja humedad (arena suelta o grava), y se alinea adecuadamente con la profundidad observada del nivel freático.

A partir del segundo estrato (2.75–4.05 m), el módulo de Poisson salta abruptamente a 0.46, lo que indica una transición clara hacia un suelo saturado. Esta tendencia se mantiene en el tercer estrato (4.05–8.5 m), donde el módulo de Poisson aumenta ligeramente a 0.47, reforzando la presencia de condiciones saturadas a mayor profundidad.

Además, se observa que mientras la velocidad de V_p aumenta progresivamente con la profundidad (de 380 m/s a 1200 m/s), la velocidad V_s disminuye levemente en el segundo estrato antes de subir nuevamente. Esta variabilidad puede estar asociada a cambios de densidad o tipo de suelo, pero no altera el patrón principal de saturación indicado por Poisson.

6.1.3 Zona 3

En la Zona 3, la calicata reportó el nivel freático a los 2.6 metros de profundidad. Al revisar los datos obtenidos por los métodos geofísicos, se observa un comportamiento gradual y consistente del módulo de Poisson, el cual aumenta progresivamente con la profundidad, indicando un cambio en las condiciones de saturación.

El primer estrato (0–1.45 m) presenta un valor de Poisson de 0.41, lo que podría asociarse a un suelo parcialmente húmedo, pero no totalmente saturado. En el segundo estrato (1.45–2.08 m), Poisson sube significativamente a 0.48, lo que ya sugiere condiciones de saturación, incluso antes de alcanzar la profundidad del nivel freático visualizado en la calicata.

A partir del tercer estrato (2.08–6.65 m), el valor aumenta aún más, alcanzando 0.49, y en el último estrato (6.65–8.35 m) se eleva a 0.50, valor límite característico de suelos completamente saturados. Esto coincide muy bien con la presencia del nivel freático en 2.6 m, ya que los cambios en Poisson y velocidades indican saturación a partir de aproximadamente 2.0 m de profundidad, alineándose con la observación visual.

En cuanto a las velocidades, se evidencia un aumento drástico de V_p en los estratos inferiores, especialmente en el último (2700 m/s), lo cual, junto con un V_s relativamente bajo (177 m/s), acentúa aún más la razón V_p/V_s , lo que también repercute en un alto valor de Poisson.

6.1.4 Zona 4

En la zona 4, el nivel freático fue identificado mediante calicata a una profundidad de 2.4 m. Sin embargo, los valores del módulo de Poisson calculados a partir de las velocidades sísmicas indican una posible condición de saturación desde los primeros estratos, lo que podría generar una contradicción con lo observado visualmente en campo.

Desde el estrato más superficial (0–0.95 m), se reporta un valor de 0.43, el cual ya se encuentra en un rango medio-alto. Posteriormente, los valores aumentan a 0.48 (0.95–1.48 m) y se mantienen en ese nivel en el siguiente estrato (1.48–2.35 m). Estos tres primeros intervalos, todos por encima de 0.43, suelen asociarse con suelos con alto contenido de humedad o incluso saturación parcial, lo cual es inconsistente con el hecho de que el nivel freático visible no se reportó hasta los 2.4 m.

A partir del estrato 2.35–4.37 m, el módulo de Poisson es de 0.49, y luego se incrementa a 0.50 en el estrato 4.37–8.3 m, lo que sí coincide con condiciones de saturación total, tal como era esperable tras alcanzar el nivel freático.

Por lo tanto, se deben considerar dos posibles interpretaciones:

- Posible error o limitación en la inspección visual de la calicata, donde el agua subterránea podría no haberse manifestado claramente en la excavación (por ejemplo, por drenaje lateral rápido, suelos de baja permeabilidad, o cambios transitorios del nivel freático).

- Limitaciones del ensayo geofísico, que puede estar sobreestimando el grado de saturación debido a heterogeneidades del suelo, materiales con alta plasticidad, o baja resolución en los primeros metros.

Existe una discrepancia parcial entre la detección visual del nivel freático y los valores del módulo de Poisson. Este hecho no invalida los resultados, pero sí sugiere la necesidad de tomar los datos con cautela y considerar múltiples fuentes de información. El análisis sigue siendo valioso, ya que refleja correctamente que a partir de los 2.35 m la saturación sí es clara, pero también deja abierta la posibilidad de revisar o complementar las observaciones de campo en futuros trabajos.

6.1.5 Zona 5

En el estrato más superficial (0–0.95 m), el módulo de Poisson es de 0.37, un valor que suele corresponder a suelos parcialmente saturados o con humedad moderada. Inmediatamente en el intervalo más fino (0.95–1.6 m), se registra un valor significativamente mayor, de 0.47, lo que indica un nivel de saturación alto o total.

En el siguiente estrato (0.6–2.48 m), el valor se mantiene elevado en 0.46, lo cual supera la profundidad donde se observó el nivel freático (2.2 m), indicando que el estado de saturación según el análisis sísmico empieza antes de lo identificado visualmente. En el último estrato (2.48–8.6 m) conserva el mismo valor de 0.46, lo cual es consistente con una condición de saturación total bajo el nivel freático, como se esperaría.

Existe una discrepancia entre la profundidad del nivel freático observado en la calicata y la profundidad donde los valores de Poisson indican saturación.

6.2 Influencia del nivel freático en los resultados geofísicos

Uno de los aspectos más relevantes en la interpretación de datos sísmicos superficiales es la influencia del nivel freático sobre las velocidades de propagación de ondas sísmicas y, por extensión, sobre las variables físicas derivadas, como el módulo de Poisson. En este estudio, la mayoría de las zonas evaluadas presentaron valores de Poisson relativamente altos desde los primeros estratos, incluso antes de alcanzar la profundidad reportada del nivel freático según las calicatas.

Este comportamiento sugiere una saturación parcial o total no detectada visualmente o bien una sobreestimación del nivel de saturación derivada del procesamiento geofísico. Un factor que podría contribuir a este desfase es el uso de modelos que correlacionan propiedades físicas del suelo (como el módulo de Poisson o el contenido de humedad) a partir de solo una de las velocidades sísmicas (por ejemplo, solo V_s o solo V_p). Este tipo de correlaciones, si bien prácticas en estudios donde no se dispone de ambos tipos de onda, pueden inducir errores al ignorar la dependencia cruzada entre V_p y V_s , que es precisamente lo que define el valor de Poisson.

En este estudio se emplearon ambas velocidades, pero el análisis comparativo evidencia que incluso modelos completos pueden presentar resultados ambiguos si las condiciones del subsuelo son complejas, como sucede en suelos con transiciones graduales de humedad, presencia de capas delgadas saturadas, o zonas con alta capilaridad. De allí que la detección indirecta del

nivel freático a través de valores de Poisson debe considerarse como una herramienta de apoyo, pero no como un sustituto del reconocimiento directo, especialmente cuando se manejan suelos heterogéneos.

La evidencia sugiere que, si bien en varios casos los valores altos de Poisson fueron consistentes con la profundidad observada del nivel freático, en otras zonas estos valores aparecieron en estratos más superficiales. Esto pone de manifiesto la necesidad de contrastar los modelos geofísicos con observaciones directas, así como de evitar el uso de correlaciones univariadas para caracterizar fenómenos multivariados como la saturación.

En futuras investigaciones, se recomienda trabajar con modelos de mayor resolución y considerar efectos como la histéresis del contenido de agua y la influencia de suelos con alta plasticidad o contenido orgánico, ya que estos pueden alterar significativamente la respuesta de las ondas sísmicas.

6.3 Validación del uso del coeficiente de Poisson

En el análisis comparativo, el coeficiente de Poisson mostró un comportamiento coherente con la presencia del nivel freático en algunas zonas. En la zona 2, se observó una correspondencia clara, ya que el valor de Poisson aumentó a partir de los 2.45 m con un valor de 0.46, alineándose adecuadamente con la detección del nivel freático a 1.8 m. La zona 1 también mostró una cierta coincidencia aceptable, pues aunque el valor de 0.45 ya aparece antes de los 2.5 m (donde se detectó el nivel freático en campo), el cambio de velocidades y el incremento progresivo del coeficiente permiten suponer una transición cercana a la profundidad real.

En cambio, otras zonas presentaron discrepancias más notables. En la zona 3, se registraron valores elevados de Poisson (superiores a 0.47) antes de alcanzar la profundidad de 2.6 m, donde se ubicó el nivel freático en calicata, lo que sugiere una detección anticipada por parte del análisis geofísico. De forma similar, en la zona 4, valores de Poisson de 0.48 se registraron incluso antes del metro de profundidad, mientras que el nivel freático fue identificado a los 2.4 m, lo que también evidencia una sobreestimación temprana. Por último, en la zona 5, se detectó un aumento abrupto del coeficiente de Poisson (de 0.37 a 0.47) muy por debajo de los 2.2 m reportados, lo que deja abierta la posibilidad de una interpretación ambigua o de un comportamiento no lineal en la respuesta de las ondas.

Estas diferencias pueden atribuirse a múltiples factores técnicos y naturales: saturaciones parciales, humedad retenida en suelos finos, presencia de capas con distinta permeabilidad, errores en el procesamiento de los de perfiles, o limitaciones en la resolución del método.

6.4 Propuestas de mejora y recomendaciones técnicas

A partir del desarrollo de esta investigación, se identifican varias oportunidades de mejora que podrían fortalecer la precisión, alcance y aplicabilidad de estudios similares en el futuro. Una de las principales observaciones es la importancia de mantener un enfoque integral en la interpretación de parámetros físicos, evitando el uso de correlaciones simplificadas que se basen en una sola velocidad de onda (ya sea V_p o V_s), especialmente para el cálculo del coeficiente de Poisson. Aunque en este trabajo no se aplicaron dichas correlaciones univariadas, su uso es común en estudios donde no se dispone de ambos tipos de onda, lo cual puede conducir a resultados con

menor fiabilidad. Por tanto, se recomienda de forma enfática que, en futuras investigaciones, se evite el uso de fórmulas que omitan la relación directa entre V_p y V_s , y que, de ser necesario aplicar estimaciones con datos limitados, estas se validen con información de campo o métodos adicionales.

Otra mejora relevante sería la toma y análisis de muestras físicas de suelo en todas las zonas de estudio, ya que la clasificación SUCS quedó limitada por la falta de datos laboratoriales para la mayoría de calicatas. Incluir estos análisis permitiría relacionar más directamente la textura, estructura y grado de saturación del suelo con los resultados sísmicos, consolidando mejor la validación del método geofísico. De igual forma, se recomienda que las calicatas y los ensayos geofísicos se realicen de manera más coordinada, asegurando que las profundidades y ubicaciones comparadas sean estrictamente equivalentes.

También sería de gran utilidad complementar los datos sísmicos con registros de humedad, resistividad eléctrica o penetrómetros dinámicos ligeros, lo que ofrecería una visión más completa del perfil geotécnico sin necesidad de depender únicamente de una variable física. Este enfoque multitécnico podría ser clave para confirmar la detección del nivel freático, sobre todo en casos donde los resultados del coeficiente de Poisson resultan ambiguos.

Finalmente, desde el punto de vista metodológico, se propone que el proceso de escalado y extracción de velocidades en los perfiles sísmicos sea automatizado o sistematizado mediante herramientas de software que reduzcan el margen de error humano y permitan análisis más

replicables. Esto no solo aumentaría la precisión, sino que también facilitaría la comparación estadística entre zonas y profundidades.

En resumen, aunque el estudio logró resultados coherentes en varias zonas, una mejora significativa se lograría al integrar mayor cantidad de datos directos, aplicar metodologías de validación cruzada y mantener un enfoque crítico hacia correlaciones simplificadas que puedan inducir errores interpretativos.

CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como propósito evaluar la eficiencia de los métodos geofísicos de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) para identificar las propiedades del suelo y su relación con la presencia del nivel freático. En base al desarrollo de la investigación, al procesamiento de datos físicos obtenidos en campo y a su contraste con observaciones directas mediante calicatas, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- La eficiencia de los métodos sísmicos en la detección del nivel freático fue variable según la zona de estudio. Si bien en algunas zonas los resultados obtenidos mediante el análisis del coeficiente de Poisson mostraron una buena correspondencia con la profundidad reportada en campo (como en las zonas 1 y 2), en otras (zonas 3, 4 y 5) se evidenciaron discrepancias significativas. Estas diferencias ponen de manifiesto que, si bien el uso combinado de V_p y V_s permite una caracterización más completa del subsuelo, la detección del nivel freático a partir de estos parámetros no siempre es concluyente, especialmente en suelos heterogéneos o con transiciones graduales.
- Uno de los factores más relevantes que afectó la interpretación de los métodos fue la alta sensibilidad del coeficiente de Poisson frente a variaciones en la saturación del suelo. En general, se observaron valores elevados de ν incluso en estratos superficiales donde no se esperaba plena saturación, lo cual puede atribuirse a la presencia de humedad retenida, materiales finos o a errores asociados al procesamiento de los datos geofísicos. Este comportamiento destaca la necesidad de no interpretar el coeficiente de Poisson de forma aislada, sino en conjunto con otros indicadores geotécnicos o ensayos complementarios.
- La ausencia de análisis laboratoriales directos en la mayoría de calicatas limitó la posibilidad de correlacionar los parámetros geofísicos con una clasificación detallada del suelo. Solo se

contó con una muestra granulométrica de una calicata no contemplada originalmente (zona 6), lo que obligó a basar gran parte de la caracterización del suelo en descripciones visuales y valores indirectos. Esta limitación, sin embargo, también permitió valorar el potencial de los métodos geofísicos como herramientas exploratorias en contextos donde no se dispone de información física completa.

- El procesamiento y aplicación de los ensayos geofísicos, fueron procesos clave, aunque dependió en gran medida de la forma en la que se gestionó. Si bien permitió establecer rangos de profundidad y velocidad representativos para el análisis, se reconoce que este proceso puede introducir errores.
- No se emplearon correlaciones simplificadas que consideraran únicamente una velocidad de onda (como V_s o V_p) para calcular el coeficiente de Poisson. Sin embargo, se identificó que su uso es frecuente en otros estudios, lo que puede generar resultados erróneos al ignorar la interdependencia entre ambas velocidades. Este hallazgo refuerza la necesidad de validar cualquier aproximación indirecta con datos de campo o ensayos adicionales, especialmente en proyectos donde la presencia del nivel freático tiene implicaciones estructurales o hidráulicas relevantes.
- La metodología planteada fue útil para evaluar las condiciones generales del subsuelo y sus propiedades físicas, aunque su precisión en la detección del nivel freático debe considerarse con cautela. En ese sentido, se logró cumplir parcialmente el objetivo general de la tesis, ya que se evidenció el potencial y también las limitaciones de los métodos MASW y de refracción sísmica en la evaluación de suelos saturados.
- Se pudo concluir que el impacto del nivel freático en la técnica MASW es muy pequeño, mientras que en la sísmica de refracción es muy importante.

- No se recomienda la utilización de correlaciones para calcular V_s a partir de V_p , ni V_p a partir de V_s , debido a que dichas correlaciones plantean un coeficiente de poisson fijo, lo cual puede llevar a errores en la determinación de parámetros dinámicos del suelo.

BIBLIOGRAFÍA


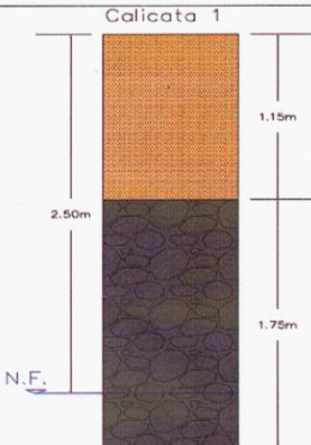

- Cervera, M., & Blanco, E. (2001). *Mecánica_de_estructuras_I_Resistencia_de_Materiales.pdf*.
 Mecánica de estructuras Libro 1 Resistencia de materiales.
https://cervera.rmee.upc.edu/libros/Mec%C3%A1nica_de_estructuras_I_Resistencia_de_Materiales.pdf
- Engineers 0, C. (2025). Down-hole Seismic Test. *Civil Engineers Blog*. <https://www.civil-engineers-2020.com/2021/03/down-holesismic-test.html>
- EVEREST GEOPHYSICS. (2022a). MASW. *Everest Geophysics*.
<https://everestgeophysics.com/es/metodos/sismicos/masw/>
- EVEREST GEOPHYSICS. (2022b). Refracción Sísmica. *Everest Geophysics*.
<https://everestgeophysics.com/es/metodos/sismicos/refraccion/>
- Figueroa, J. C., & Bravo, F. J. A. (2014). *FRANCISCO JAVIER ARELLANO BRAVO CONCEPCIÓN-CHILE*.
- GEORYS INGENIEROS S.A.C. (2016). *MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA*.
<https://www.georys.com/wp-content/uploads/2020/05/Presentacion-Refraccion.pdf>
- GEORYS INGENIEROS S.A.C. (2024). *ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)*.
- Ingeotecnia. (2025). *¿Qué es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)?* GIG.
<https://www.ingeotecnia.com/sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-sucs>
- Leong, E. C., & Cheng, Z. Y. (2016). Effects of Confining Pressure and Degree of Saturation on Wave Velocities of Soils. *International Journal of Geomechanics*, 16(6), D4016013.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000727](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000727)

- MASW. (2009). *Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)*.
<https://www.masw.com/WhatisMASW.html>
- Mojica, A., Cubilla, O., Silva, E., Guevara, J. L.-D., Ruíz, A., Ho, C. A., & Toral, J. (2022).
Combinando el método de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales
para la detección de niveles freáticos someros en el noroccidente del Istmo de Panamá.
Revista de I+D Tecnológico, 18(1), 108-116.
- P, J. (2019, mayo 18). Sísmica de refracción: Definición, aplicaciones e interpretación.
geotecniafacil.com. <https://geotecniafacil.com/sismica-de-refraccion-perfiles/>
- Universidad de Sonora. (s. f.). *Capitulo1*. Recuperado 28 de junio de 2025, de
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2405/Capitulo1.pdf>
- Vazquez. (2017). *Clase 24 PEPS (Estratigra sis-principios y conceptos)*.
[https://usuarios.geofisica.unam.mx/gvazquez/estratiGAB/Zona%20desplegar/Clases/Clase%2024%20PEPS%20\(Estratigra%20sis-principios%20y%20conceptos\).pdf](https://usuarios.geofisica.unam.mx/gvazquez/estratiGAB/Zona%20desplegar/Clases/Clase%2024%20PEPS%20(Estratigra%20sis-principios%20y%20conceptos).pdf)

ANEXOS


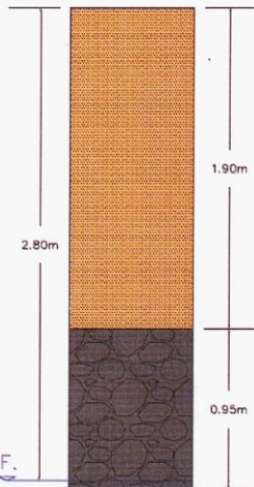


Anexo A.

Informe Calicata 1

REGISTRO CALICATA		
		
PROYECTO: CANCHAS CHALLUABAMBA		
CALICATA:	1	UBICACIÓN: Challuabamba
COORDENADAS UTM:	734411.0 E ; 9685190.6 N 2335.1 m	
FECHA DE REALIZACIÓN:	07 de abril de 2025	HORA: 10:35
SUPERVISOR: Ing. David Becerra		
EXCAVACIÓN: Mecánica		
PROFUNDIDAD:	2.90 m	
LONGITUD:	1.80 m	
ANCHO:	0.80 m	
NIVEL FREÁTICO:	2.50 m	
OBSERVACIONES DE LA CALICATA		
# Estrato	Profundidad (m)	Descripción Visual del Material
Estrato 1	0.00 - 1.15	Material color café, con tamaño de grano pequeño (arena-arcilla-limo) contiene humedad, no presenta plasticidad. Gravas de tamaño 2-3cm redondeadas, buen sorteo, material no consolidado)
Estrato 2	1.15 - 2.90	Material color gris verdoso, saturado, alta humedad, plástico, contiene arena y limos, contenido orgánico por olor. Gravas de tamaño moderado >10cm de forma redondeada, se encuentra el nivel freático
OBSERVACIÓN:		
REGISTRO FOTOGRÁFICO		
		
		

Anexo B.

Informe Calicata 2

REGISTRO CALICATA								
			PROYECTO: CANCHAS CHALLUABAMBA					
			CALICATA:	2	UBICACIÓN:	Challuabamba		
			COORDENADAS UTM:		734435.2 E ;	9685199.7 N	2334.9 m	
			FECHA DE REALIZACIÓN:		07 de abril de 2025		HORA:	11:05
			SUPERVISOR: Ing. David Becerra			EXCAVACIÓN: Mecánica		
PROFUNDIDAD:	2.85 m		<p style="text-align: center;">Calicata 2</p>  <p style="text-align: center;">N.F.</p>					
LONGITUD:	1.80 m							
ANCHO:	0.80 m							
NIVEL FREÁTICO:	2.80 m							
OBSERVACIONES DE LA CALICATA								
# Estrato	Profundidad (m)	Descripción Visual del Material						
Estrato 1	0.00 - 1.90	Material color café, arena con poca (arcilla-limo), baja humedad, no presenta plasticidad, gravas menores a 2cm de diámetro.						
Estrato 2	1.90 - 2.85	Material color negro, arena con contenido de arcilla-limo, presenta alta humedad, plasticidad, gravas mayores a 3-5cm, material orgánico por olor, gravas esféricas						
OBSERVACIÓN:								
REGISTRO FOTOGRÁFICO								
								


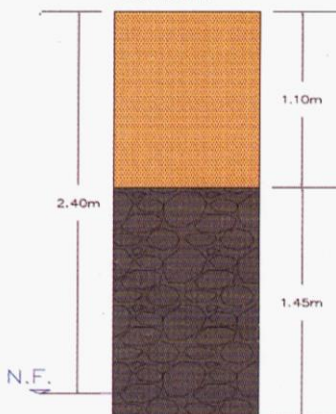

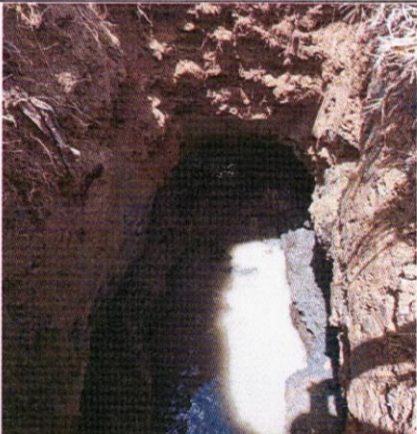
Anexo C.

Informe Calicata 3



Anexo D.

Informe Calicata 4

REGISTRO CALICATA			
 GEO & GEO <small>INGENIERIA GEOLÓGICA GEOTÉCNICA GEOTINGENIERÍA</small>		PROYECTO: CANCHAS CHALLUABAMBA	
		CALICATA: 4	UBICACIÓN: Challuabamba
		COORDENADAS UTM: 734396.7 E; 9685162.9 N 2335.8 m	
		FECHA DE REALIZACIÓN: 07 de abril de 2025	HORA: 12:10
		SUPERVISOR: Ing. Marcos Silva	
EXCAVACIÓN: Mecánica			
PROFUNDIDAD:	2.55 m	<p style="text-align: center;">Calicata 4</p> 	
LONGITUD:	1.75 m		
ANCHO:	0.83 m		
NIVEL FREÁTICO:	2.40 m		
OBSERVACIONES DE LA CALICATA			
# Estrato	Profundidad (m)	Descripción Visual del Material	
Estrato 1	0.00 - 1.10	Material café arenoso grano medio-fino con matriz arcilla/limo no plástica y gravas redondeadas de 2 a 3cm, con presencia de humedad.	
Estrato 2	1.10 - 2.55	Material gris: arcilla/limo plástico, contiene arena y gravas redondeadas >10cm.	
OBSERVACIÓN:			
REGISTRO FOTOGRÁFICO			
			


Anexo E.

Informe Calicata 5

REGISTRO CALICATA		
		PROYECTO: CANCHAS CHALLUABAMBA
		CALICATA: 5 UBICACIÓN: Challuabamba
		COORDENADAS UTM: 734338.6 E ; 9685156.8 N 2336.5 m
		FECHA DE REALIZACIÓN: 07 de abril de 2025 HORA: 12:40
		SUPERVISOR: Ing. Marcos Silva EXCAVACIÓN: Mecánica
PROFUNDIDAD:	2.90 m	<p style="text-align: center;">Calicata 5</p> 
LONGITUD:	1.90 m	
ANCHO:	0.80 m	
NIVEL FREÁTICO:	2.20 m	
OBSERVACIONES DE LA CALICATA		
# Estrato	Profundidad (m)	Descripción Visual del Material
Estrato 1	0.00 - 0.60	Material café arenoso grano medio-fino con matriz arcilla/limo no plástica y gravas redondeadas de 2 a 3cm, con presencia de humedad.
Estrato 2	0.60 - 2.90	Material gris: arcilla/limo plástico, contiene arena y gravas redondeadas >10cm.
OBSERVACIÓN:		
REGISTRO FOTOGRÁFICO		
		

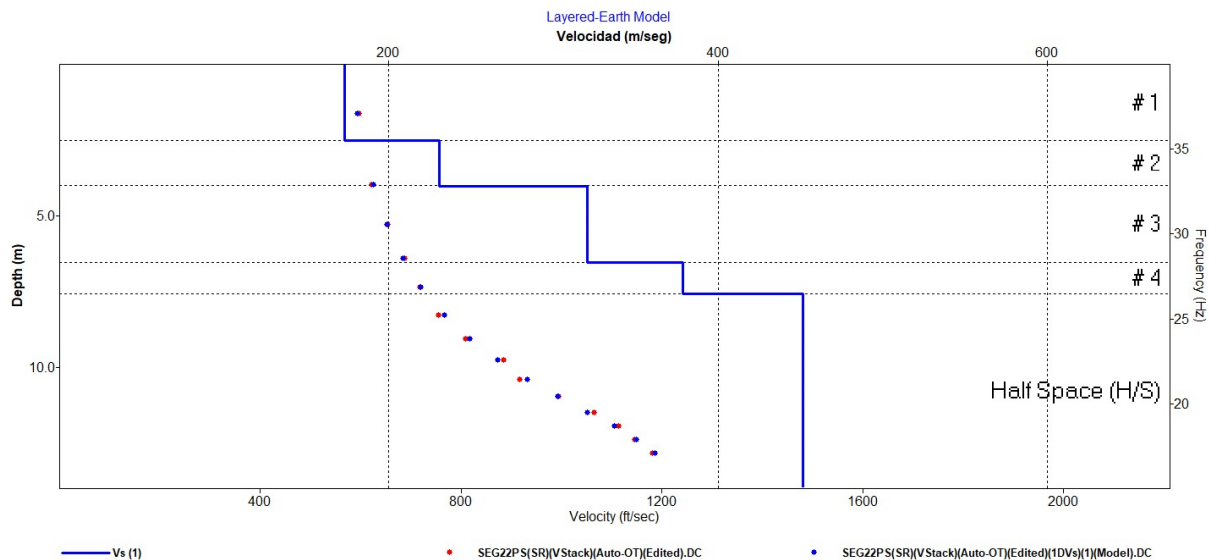
Anexo E.

SUCS Calicata 6

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (NORMA ASTM D1140 - 17/ISO 17892-4)													
Proyecto:	CANCHAS CHALLUBAMBA		Perforación:	C8									
Solicitante:	Ab. Sofía Bazara		Muestra:	M1									
Ubicación de muestra (UTM):	7343747 E	98851451 N	Elevación Terreno (m.snm):	2337									
			Profundidad muestra:	0.09 a 1.10 m									
Peso tara [gr]	105.33												
Peso seco + tara [gr]	1016.10												
Peso lavado seco + tara [gr]	784.90												
Peso seco [gr]	910.27												
Peso lavado seco [gr]	659.07												
# de Tamiz	Abertura	Peso de material retenido [gr]	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa	Valor corrección							
N. 1	25.4	0.0	0.0%	0.0%	100.0%								
N. 3/4	49	0.0	0.0%	0.0%	100.0%								
N. 3/8	9.5	11.1	1.2%	1.2%	98.8%								
N. 4	4.75	15.5	1.7%	2.9%	97.1%								
N. 10	2.00	41.4	4.5%	7.5%	92.5%								
N. 20	0.84	104.7	11.5%	19.0%	81.0%								
N. 40	0.43	155.9	17.1%	36.1%	63.9%								
N. 80	0.26	142.4	15.6%	51.7%	48.3%								
N. 140	0.11	154.9	17.0%	68.7%	31.3%								
N. 200	0.08	32.8	3.6%	72.3%	27.7%								
Fondo		0.7	0.1%										
Finos lavado		251.2	27.6%										
TOTAL		910.3											
Peso Inicial antes de tamizar		910.27											
Cálculo de error		0.0%											
Valor de corrección		0.0											
Tamiz de corrección		#N/A											
Peso muestra	Peso Grava [gr]	Peso Arena	Peso Finos [gr]										
910.27	26.60	631.80	251.90										
100.0%	2.9%	69.4%	27.7%										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">HUMEDAD NATURAL</td> <td style="width: 50%;"></td> </tr> <tr> <td>PESO HUM.</td> <td>1032.97</td> </tr> <tr> <td>PESO SECO</td> <td>910.27</td> </tr> <tr> <td>% HUMEDAD</td> <td>13.5%</td> </tr> <tr> <td>M. de finura arena</td> <td>2.58</td> </tr> </table>				HUMEDAD NATURAL		PESO HUM.	1032.97	PESO SECO	910.27	% HUMEDAD	13.5%	M. de finura arena	2.58
HUMEDAD NATURAL													
PESO HUM.	1032.97												
PESO SECO	910.27												
% HUMEDAD	13.5%												
M. de finura arena	2.58												
													
Ing. Alfredo Vázquez Roura, M.Sc. RESPONSABLE													
CLASIFICACIÓN SUCS: SM - Arena limosa CLASIFICACIÓN A SHTO: A-2-4 Grava y arena arcillosa o limosa													

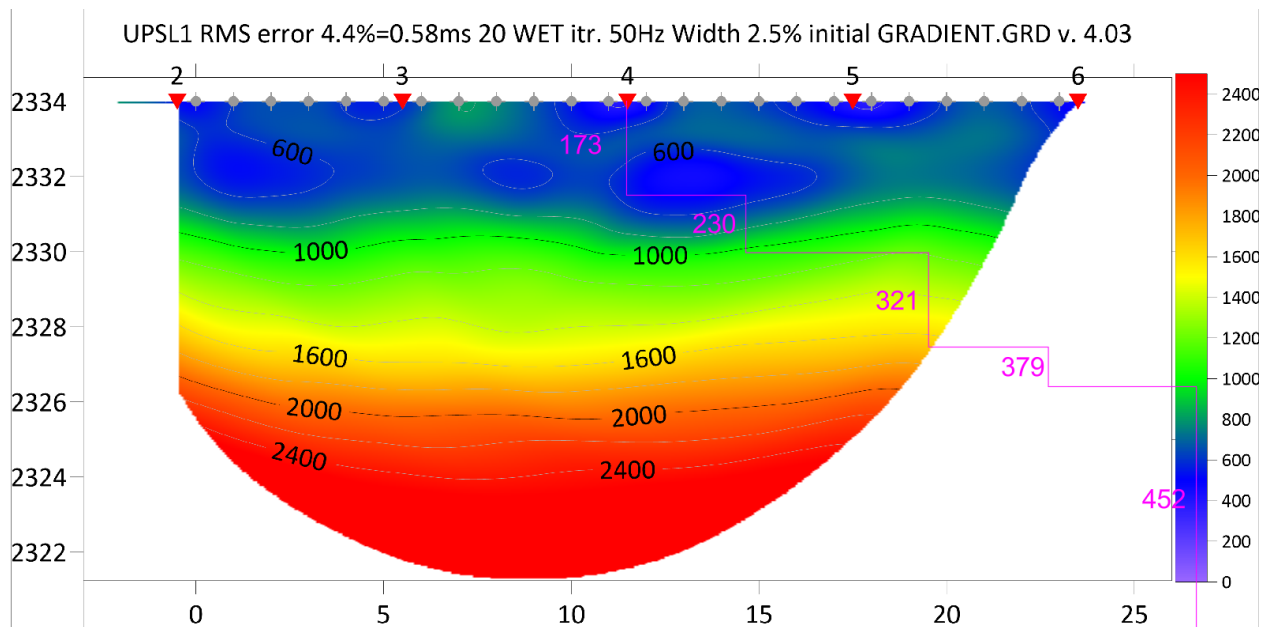
Anexo F.

LMI (MASW Zona 1)



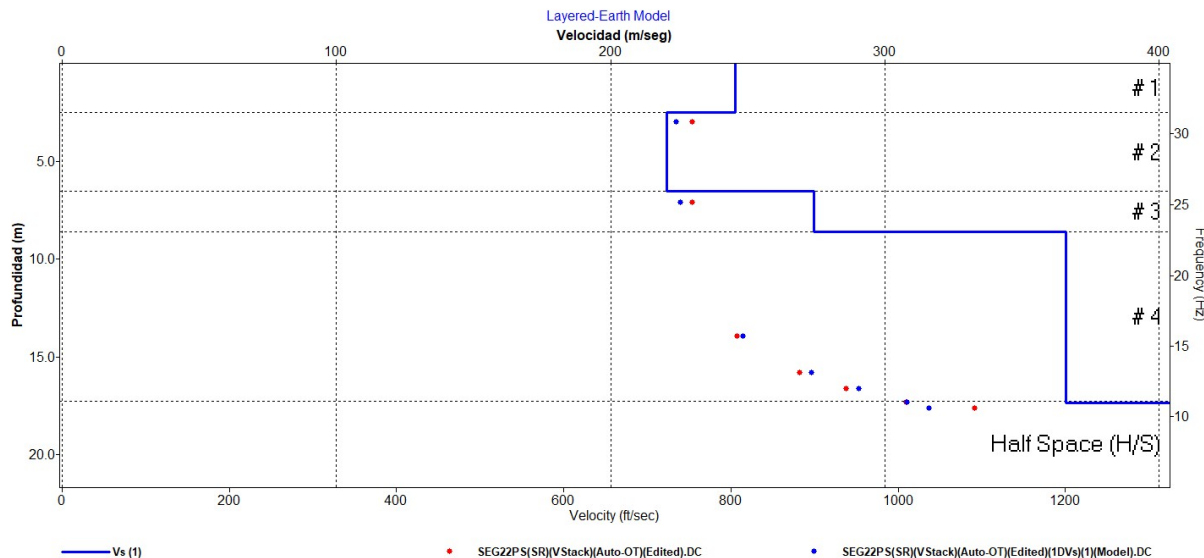
Anexo G.

LSI (Sísmica Zona 1)



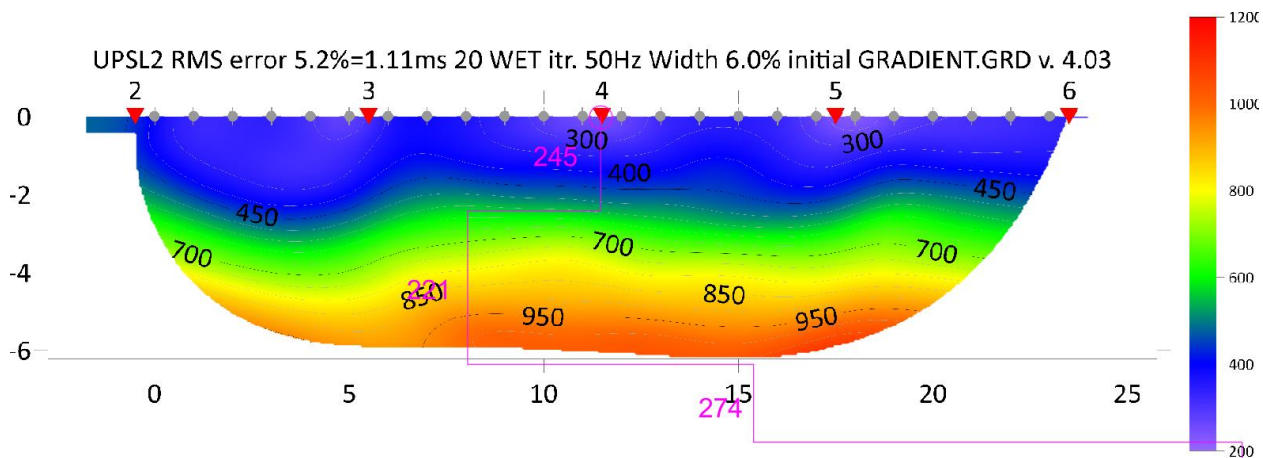
Anexo H.

LM2 (MASW Zona 2)



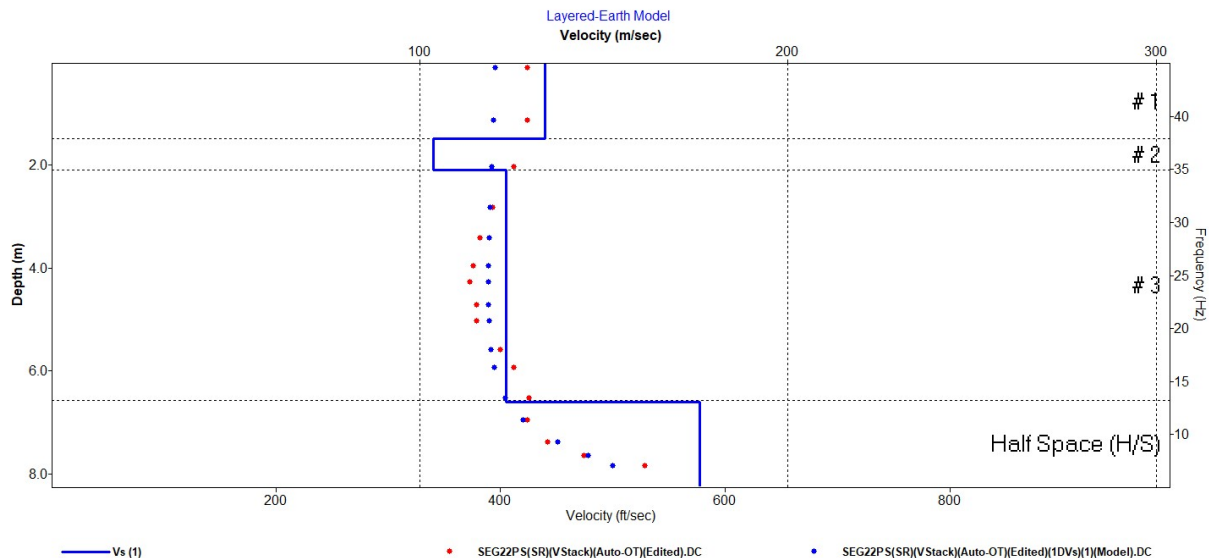
Anexo I.

LS2 (Sísmica Zona 2)



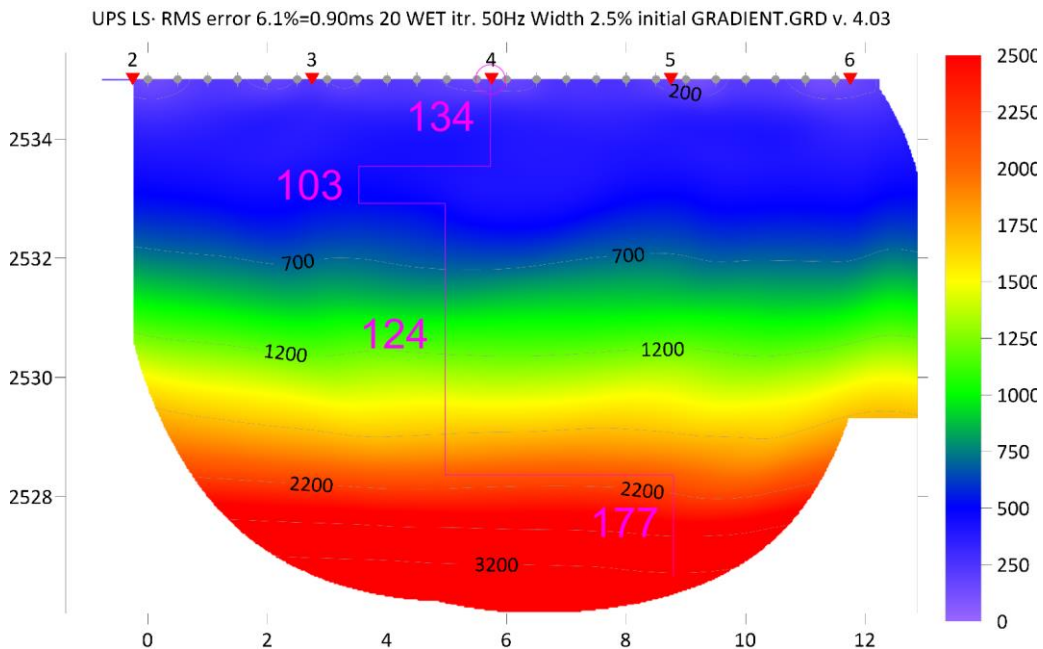
Anexo J.

LM3 (MASW Zona 3)



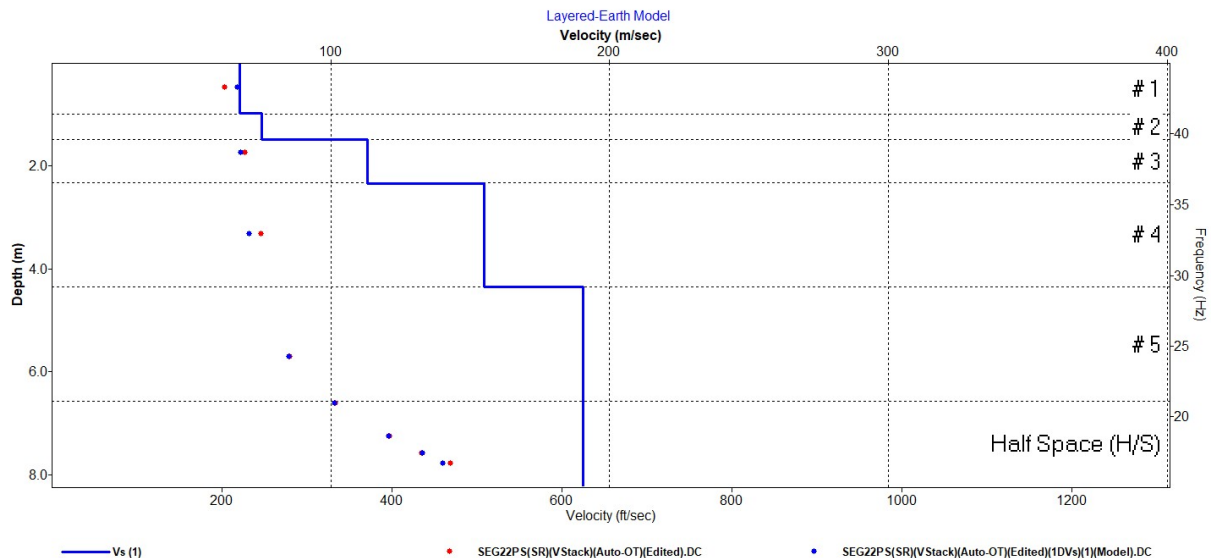
Anexo K.

LS3 (Sísmica Zona 3)



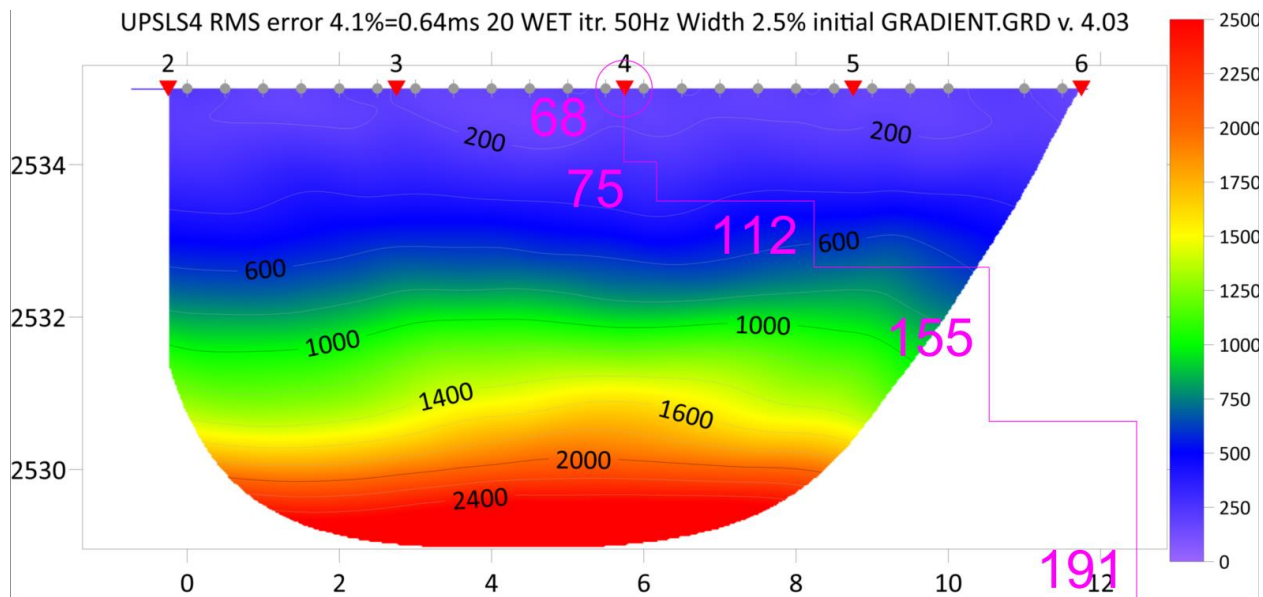
Anexo L.

LMI (MASW Zona 4)



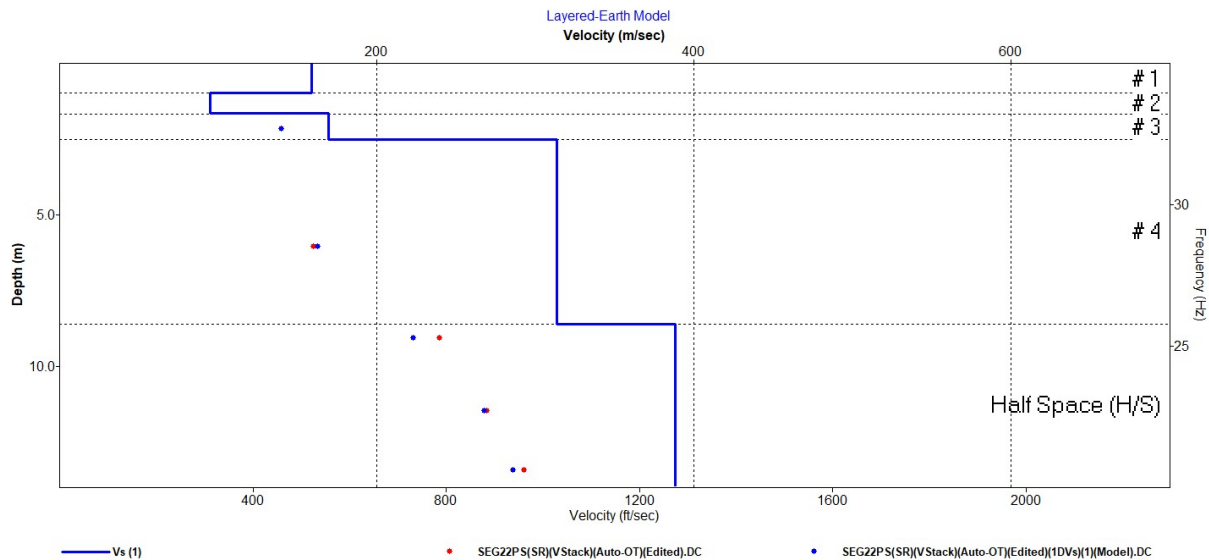
Anexo M.

LS1 (Sísmica Zona 4)



Anexo N.

LMI (MASW Zona 5)



Anexo O.

LS1 (Sísmica Zona 5)

